



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS  
APLICADAS – FATECS  
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

**MATHEUS MATOS LEPESQUEUR BROCHADO**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO ASFALTO PRÉ-MISTURADO  
A FRIO EM RODOVIAS DE MÉDIO E BAIXO TRÁFEGO.**

Brasília  
2014

MATHEUS MATOS LEPESQUEUR BROCHADO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO ASFALTO PRÉ-MISTURADO  
A FRIO EM RODOVIAS DE MÉDIO E BAIXO TRÁFEGO.**

Trabalho de Curso (TC) apresentado  
como um dos requisitos para a conclusão  
do curso de Engenharia Civil do UniCEUB  
- Centro Universitário de Brasília

Orientador: Jairo Furtado Nogueira.

Brasília  
2014

MATHEUS MATOS LEPESQUEUR BROCHADO

## **ESTUDO DA VIABILIDADE DO ASFALTO PRÉ-MISTURADO A FRIO EM RODOVIAS DE MÉDIO E BAIXO TRÁFEGO.**

Trabalho de Curso (TC) apresentado  
como um dos requisitos para a conclusão  
do curso de Engenharia Civil do UniCEUB  
- Centro Universitário de Brasília

Orientador: Jairo Furtado.

Brasília, 27 de Junho de 2014.

### **Banca Examinadora**

---

Eng. Civil: Jairo Furtado Nogueira, MSc. (Uniceub)  
Orientador

---

Eng. Civil: Jocinez Nogueira Lima, MSc. (Uniceub)  
Examinador Interno

---

Eng. Civil: Giuseppe Miceli Junior, Msc. (Iesplan)  
Examinador Externo

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, para que não haja equívocos e esquecer alguém que ajudou diretamente ou indiretamente, para o desenvolvimento desta pesquisa, agradeço de forma geral, pela ajuda de todos.

Agradeço em especial ao professor Jairo Furtado, pela orientação durante todo o trabalho, sempre com disposição a ajudar em todas as dúvidas sobre o tema em questão.

A meus pais e irmãos, pelo apoio constante compartilhando momentos de alegria e dando forças nos momentos difíceis. Espero poder retribuir um dia tudo de bom que vocês me proporcionaram.

Aos engenheiros Flavio Souza e Olavo Sabino por me proporcionar momentos únicos de profissionalismo e amizade.

A todos os meus colegas de curso que me acompanharam durante toda a graduação e em especial aos colegas Raíra Michahelles, Danilo Macedo e Vinicius Rezende.

## RESUMO

A malha rodoviária brasileira vem tendo participação fundamental no transporte de cargas e de pessoas, exigindo uma constante necessidade de melhoria da qualidade e de sua ampliação. Em consequência disso, o estudo da pavimentação rodoviária no Brasil, vem adquirindo importância crescente ao longo dos últimos 60 anos. O crescente volume de tráfego nas rodovias e o consequente aumento dos esforços transmitidos aos pavimentos são questões condicionantes para que a camada de revestimento asfáltica seja tratada com uma atenção especial, já que recebe diretamente todo esforço aplicado. Esta pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento e a viabilidade da utilização do Pavimento Pré-Misturado a Frio (PMF), buscando informar os conceitos e suas propriedades, mostrando suas particularidades executivas e funcionais, bem como os locais apropriados para a aplicação desse revestimento. A importante ferramenta de construção de pavimentos constitui-se em atender as necessidades dos usuários dentro de um plano estratégico e que garantam a melhor relação Custo x Benefício. Assim, o uso do pré-misturado a frio pode ser usado em rodovias de médio e baixo volume de tráfego e trazer diversos benefícios relevantes, tanto em relação ao custo por utilizar máquinas mais simples, quanto a um menor impacto ambiental, devido à baixa produção de gases tóxicos e poluentes.

**Palavras-chave:** Pavimentação. Revestimentos Asfálticos. Malha Rodoviária.

## **ABSTRACT**

The Brazilian highway has had a fundamental role in the transport of freight and people, requiring a constant need to improve the quality of their expansion. Consequently, the study of road paving in Brazil, has been gaining increasing importance over the last 60 years. The growing volume of traffic on the roads and the consequent increase of the forces transmitted to the floors are conditioning issues so that the layer of asphalt coating is treated with special attention, since it receives every effort directly applied. This research aims to study the behavior and viability of using Pre-Mixed Floor Cold (PMF), seeking to inform the concepts and their properties, showing their executive and functional characteristics, as well as appropriate for the application of this coating locations. The major tool for pavement construction is on meeting the needs of users within a strategic plan and ensures the best cost-benefit ratio. Thus, the use of pre-mixed cold can be used on highways medium and low traffic volume and bring several important benefits, both in terms of cost per use simple machines, as a lower environmental impact due to low production pollutants and toxic gases.

**Keywords:** Paving. Asphalt coatings. Highway Network.

## LISTA DE SIGLAS

AAF – Areia asfalto a frio

CA – Concreto asfáltico

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente

CR – Cura rápida

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EME – Misturas de módulo elevado

MR – Módulo de rigidez

OGEM – *Open Grade Emulsion Mixes*

OSU – *Oregon State University*

PMF - Pavimento Pré-Misturado a Frio

PMFA – Pré-misturado a frio aberto

PMFD – Pré-misturado a frio denso

PMFsD – Pré-misturado a frio semi-denso

RR 1C – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida

RR 2C – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida

TSS – Tratamento superficial simples

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cargas aplicadas em um pavimento.....	13
Figura 2 - Pavimento Rígido – Seção típica.....	14
Figura 3 - Distribuição de cargas em pavimento rígido.....	15
Figura 4 - Pavimento Flexível.....	16
Figura 5 - Distribuição de cargas em pavimento flexível.....	18
Figura 6 - Comparação de distribuição de cargas entre pavimentos equivalentes.....	19
Figura 7 - Fases da construção do revestimento macadame betuminoso por penetração.....	23
Figura 8 - Fases da construção do tratamento superficial simples (TSS).....	24
Figura 9 - Usina Gravimétrica.....	26
Figura 10 - Usina volumétrica.....	27
Figura 11 - Execução de um revestimento utilizando Pré-misturado a Frio.....	29
Figura 12 - Usina de Pré-Misturado a Frio.....	30
Figura 13 - Execução da Lama Asfáltica.....	32
Figura 14 - Fluxograma do projeto da mistura de um PMF.....	41
Figura 15 - Processo de construção de uma camada de PMF.....	42
Figura 16 - Esquema de uma usina estacionária para produção de mistura a frio.....	43
Figura 17 - Exemplo de usina de pré-misturado a frio móvel.....	44
Figura 18 - Esquema de componentes de uma vibroacabadora de pneus.....	45
Figura 19 - Esquema de uma vibroacabadora de esteiras.....	46
Figura 20 - Exemplos de rolo compactador estático, (a) Pneumático, (b) Liso.	47
Figura 21 - Exemplo de rolo vibratório.....	48
Figura 22 - Custo Unitário do PMF.....	49
Figura 23 - Custo Unitário do CBUQ.....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de revestimentos asfálticos empregados em pavimento de rodovias.....	22
Tabela 2 - Classificação do PMF.....	34

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivo Específico	11
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	12
2.1 Pavimentos	12
2.1.1 Pavimentos Rígidos	14
2.1.2 Pavimentos Semirrígidos ou Semiflexíveis	15
2.1.3 Pavimentos Flexíveis	16
2.2 Revestimento	19
2.2.1 Tipos de Revestimento Asfálticos	21
2.2.2 Asfalto Pré-Misturado a Frio	32
2.2.3 Histórico	33
2.2.4 Definições e Classificações dos Pré-Misturados a Frio	34
2.3 Aspectos Funcional, Estrutural e Hidráulico dos PMF	36
<b>3. MATERIAIS E EXECUÇÃO</b>	39
3.1 Materiais	39
3.2 Processo Executivo	42
3.2 Mistura	43
3.4 Transporte e lançamento de misturas asfálticas	44
3.5 Compactação	46
3.6 Custo Executivo	48
3.9 Vantagens e Desvantagens	51
<b>4. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b>	54
<b>5. CONCLUSÕES</b>	56
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	57

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte são os elementos estruturantes da vida econômica e social dos Países. Distintos modos de transporte oferecem os deslocamentos de pessoas e de cargas. No Brasil, a principal forma de locomoção é realizada através do transporte rodoviário, que conta com 1,8 milhões de quilômetros de estrada e rodovias, por onde passam cerca de 56% de todas as cargas movimentadas no País, no entanto, grande parte dessas rodovias encontram-se em péssimas condições de fluxo, proporcionando um grande risco aos usuários (CNT, 2012).

Diante da importância do transporte rodoviário no Brasil, a infraestrutura das estradas assume um papel fundamental na mobilidade do País. O pavimento construído para suportar as cargas de tráfego ao longo de 10, 15 ou no máximo 20 anos (Manual do DNIT), tem a tarefa de fornecer segurança, conforto e economia.

O revestimento, também conhecido de capa de rodagem, é a camada mais nobre do pavimento, por receber diretamente a ação do tráfego. Esta camada, preferencialmente, deve ter uma longa vida útil, ser impermeável, apresentar boas condições de aderência aos veículos e receber com frequências manutenções (FERRARA, 2006). As camadas subjacentes ao revestimento, subleito, sub-base e base, em geral, são granulares, e essas camadas resistem ao cisalhamento por causa do atrito entre as partículas de seus materiais constituintes.

O papel dos custos totais envolvidos em uma obra de pavimentação tem grande relevância. O uso de novas alternativas de revestimento asfáltico pode trazer diversos benefícios, tanto em relação a custo, quanto aos variados impactos causados na vida útil do pavimento. Neste contexto, a partir da década de 70, Estados Unidos, França, Espanha dentre outros países, deram início a estudos mais avançados sobre emulsões asfálticas, levando um desenvolvimento sobre o assunto, devido à crise do petróleo em 1974. Buscando a melhoria da pavimentação, a utilização do uso de Pré-misturado a Frio (PMF) assumiu crescente expressão no contexto mundial e no Brasil.

Estudos sobre o PMF vêm apontando muitas vantagens para a conservação ou melhoramento dos pavimentos asfálticos, através de superposição com novas camadas, objetivando a reabilitação da superfície de rolamento e também usada

como revestimento asfáltico em camada de rolamento, constituindo a capa asfáltica sobre base imprimida, na implantação de pavimentos em vias urbanas e em rodovias de médio e baixo volume de tráfego. O PMF é um revestimento produzido por uma mistura asfáltica executado à temperatura ambiente, composta de agregado mineral graduado, material de enchimento (Fíler) e emulsão asfáltica, espalhada e comprimida a frio.

A tecnologia do Pré-misturado a Frio, contemplada por especificações brasileiras para a determinação das características dos materiais empregados e procedimentos de execução, visando garantir a qualidade do serviço a ser realizado. Estudos e pesquisas, como a que se descreve neste trabalho, tem o intuito de verificar e auxiliar o maior desenvolvimento da aplicação do Pré-misturado a Frio em rodovias de médio e baixo volume de tráfego.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

É de interesse, neste trabalho, entender e analisar a aplicação do Pré-misturado a Frio nas estradas e rodovias, avaliar o uso e o aproveitamento desse material em camadas de revestimento, recapeamento, reperfilagem ou base de pavimentos rodoviários.

### 1.1.2 Objetivo Específico

- Verificar o comportamento e a viabilidade da utilização do Pavimento Pré-Misturado a Frio (PMF) e fazer um comparativo do processo executivo com o asfalto convencional (CBUQ).
- Através de revisões bibliográficas, conceituar os revestimentos asfálticos, analisando benefícios, desvantagens e características do pavimento Pré-misturado a Frio.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PAVIMENTOS

Pavimentar, segundo Balbo (2007), é a atividade de construção de estrutura que visa primordialmente à melhoria operacional para o tráfego, independente de sua natureza, na medida em que é criada uma superfície mais regular e mais aderente, características que permitem maior conforto no deslocamento e mais segurança em condições de pista úmida ou molhada.

O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao custo mínimo possível, considerando diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação obrigatórios (BALBO, 2007).

De acordo com Santana (1993), o pavimento é uma estrutura construída sobre a superfície obtida pelos serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

O pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a:

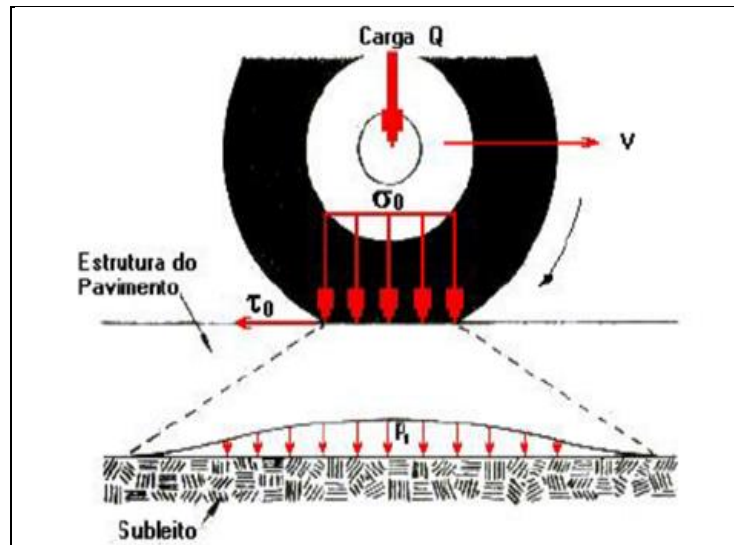
- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento (NBR 7207/82).

As cargas são transmitidas à fundação de forma aliviada e também criteriosa, impedindo a ocorrência de deformações na estrutura. Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática.

No entanto, com o passar do tempo, o pavimento vai se desgastando, acumulando deformações plásticas e formando trincas nas camadas decorrente de uma combinação entre cargas aplicadas por veículos e efeitos do intemperismo.

Segundo Santana (1993), um pavimento quando solicitado por uma carga rolante, isto é uma roda pneumática de um veículo com carga  $Q$  que se desloca com a velocidade  $V$ , recebe uma tensão vertical  $P_0$  (compressão) e uma tensão horizontal  $T_0$  (cisalhamento), conforme Figura 1.

Figura 1 - Cargas aplicadas em um pavimento



Fonte: Santana (1993)

- A tensão  $P_0$  é diluída pelo pavimento, de modo que o subleito recebe uma tensão bem menor;
- A tensão  $T_0$  agindo na superfície do pavimento exige que a mesma apresente uma coesão mínima. A superfície deve ser bastante impermeável.

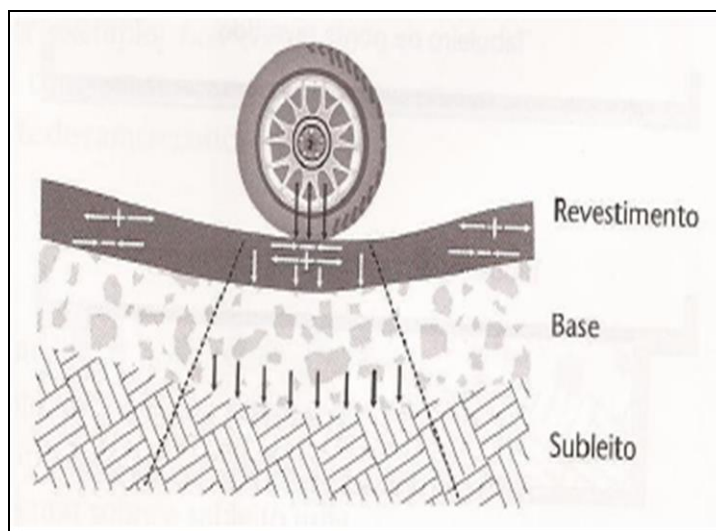
Ao chegar perto da vida útil, o pavimento começa a perder a capacidade de servir com uma boa qualidade os seus usuários. As fundações (revestimento, base, sub-base e subleito) e operações de manutenção e restauração dos pavimentos dependem muito pelo tipo de revestimento utilizado (FERRARA, 2006). Assim, os pavimentos podem ser divididos basicamente em três grandes grupos: Pavimentos rígidos, Pavimentos semi-rígidos ou semiflexível e Pavimentos flexíveis.

### 2.1.1 Pavimentos Rígidos

Pavimentos rígidos são constituídos basicamente por uma placa de concreto que praticamente absorve toda a solicitação, distribuindo-a em grande área. Ao chegar ao subleito, à carga encontra-se suficientemente amortecida. São constituídos basicamente por três camadas “revestimento”, “base” e “subleito”.

Segundo Bernucci et al (2008), os pavimentos rígidos, em geral associados aos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento), são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (flexíveis). A Figura 2 ilustra uma seção típica de um pavimento rígido.

Figura 2 - Pavimento Rígido – Seção típica

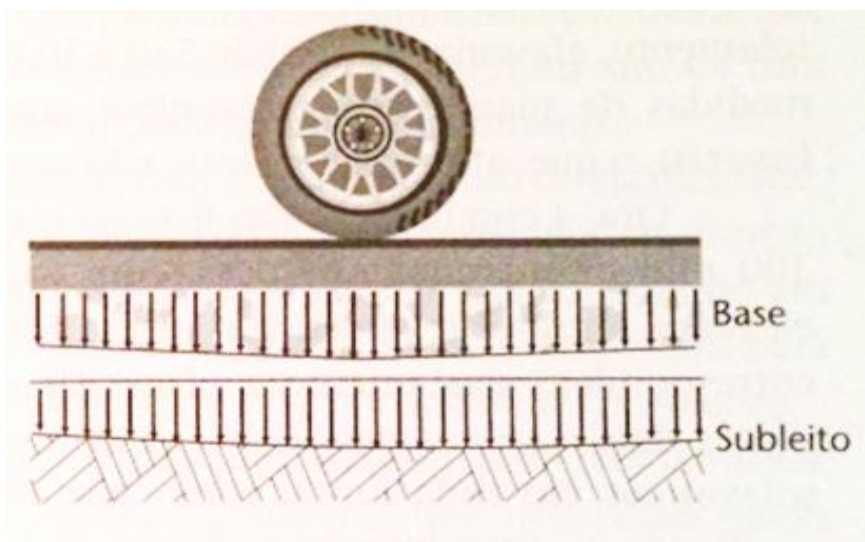


Fonte: Balbo (2007)

As placas de cimento Portland, se bem projetadas e construídas, tem vida mais longa e maior espaçamento entre manutenções quando comparado ao pavimento flexível, oferece resistência ao efeito solvente dos combustíveis e caracterizam-se por apresentar: Alta rigidez; Alta resistência; e pequenas espessuras, definidas em função da resistência a flexão.

As placas distribuem as tensões imposta pelo carregamento de forma aproximadamente uniforme, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Distribuição de cargas em pavimento rígido



Fonte: Balbo (2007)

### 2.1.2 Pavimentos Semirrígidos ou Semiflexíveis

É considerada uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. Um pavimento com revestimento asfáltico e base de solo-cimento, solo-cal entre outras, que apresenta uma pequena melhoria a resistência à tração (FERRARA, 2006).

No Reino Unido, Croney e Croney (1991) não apresentam a expressão “pavimento semirrígido” como diferenciadora de estrutura clássicas de pavimentos; usam apenas os termos “rígido”, que obriga a presença de revestimento em concreto de cimento Portland, e “flexível”, que sempre comportaria um revestimento asfáltico, de modo que o uso de um deles elimina a hipótese restante. Os pavimentos seriam, então, ou flexíveis ou rígidos (BALBO, 2007).

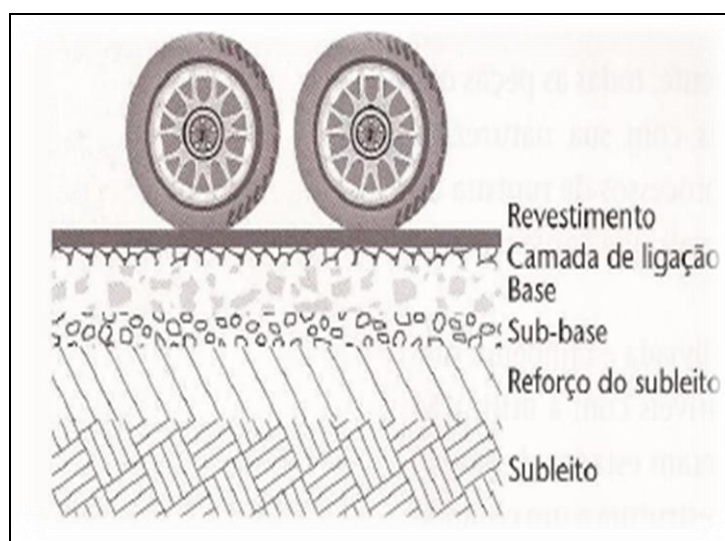
No meio profissional, e mesmo acadêmico, vez ou outra, há quem conteste o uso desse termo (semiflexível), para ter uma definição das camadas quanto as suas funções específicas e distintas umas das outras, é necessário, em uma época de inúmeras inovações de materiais, adotar medidas laboratoriais e métodos teóricos de cálculo, assim, seria interessante enfrentar o problema tomando as contradições das definições típicas e clássicas (BALBO, 2007).



### 2.1.3 Pavimentos Flexíveis

Pavimentos flexíveis são aqueles revestidos com materiais betuminosos ou asfáltico. A principal vantagem é a rapidez de execução, quanto à construção do pavimento ou as reparações, são mais fáceis e rápidas, podendo assim, liberar o tráfego mais rápido. A estrutura do pavimento deforma quando submetido às cargas do tráfego. Composto por varias camadas que devem trabalhar em conjunto para absorver as tensões verticais de compressão até aos níveis que o terreno de fundação possa suportar, cada camada absorve parte das solicitações imposta e transmite o restante às camadas localizadas em níveis inferiores, sem que haja deformações excessivas na estrutura do pavimento (Figura 4).

Figura 4 - Pavimento Flexível



Fonte: Balbo (2007)

De acordo com Bernucci et al (2008), pavimentos flexíveis, em geral associados aos asfálticos, são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento, em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediarias ou de ligação. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a

plataforma da estrada termina após a conclusão dos cortes e aterros. As camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural. Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessura das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos.

Ainda segundo o autor, os revestimentos asfálticos podem ter duas maneiras para associar os agregados aos materiais asfálticos, por penetração ou por mistura. Por penetração refere-se aos executados através de uma ou mais aplicações de material asfáltico e de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas. No revestimento por mistura, o agregado é pré-envolvido com o material asfáltico, antes da compressão. Quando o pré-envolvimento é feito na usina, denomina-se pré-misturado na pista (BERNUCCI et al, 2008).

O dimensionamento dos pavimentos é determinado pelas espessuras das camadas e o tipo dos materiais a serem utilizados. As principais camadas são:

a) Revestimento

- Destinado a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste.
- Constituído por uma combinação de agregado mineral e material betuminoso.
- Suporta e transmite as cargas aplicadas pelos veículos
- Impermeabilizante

b) Camada de ligação

- Camada intermediária, entre o revestimento e a base
- Mistura asfáltica (camada de binder)

c) Base

- Camada estruturalmente mais importante
- Resiste e distribui os esforços provenientes da ação do tráfego, atenuando a transmissão destes esforços às camadas subjacentes.
- Geralmente construída por materiais estabilizados granulometricamente ou quimicamente, através do uso de aditivos (cal, cimento, betume).

d) Sub-base

- Camada utilizada para reduzir a espessura da base.
- Resisti às cargas transmitidas pela base.
- Drenar infiltrações e controlar a ascensão da água.

e) Reforço do subleito

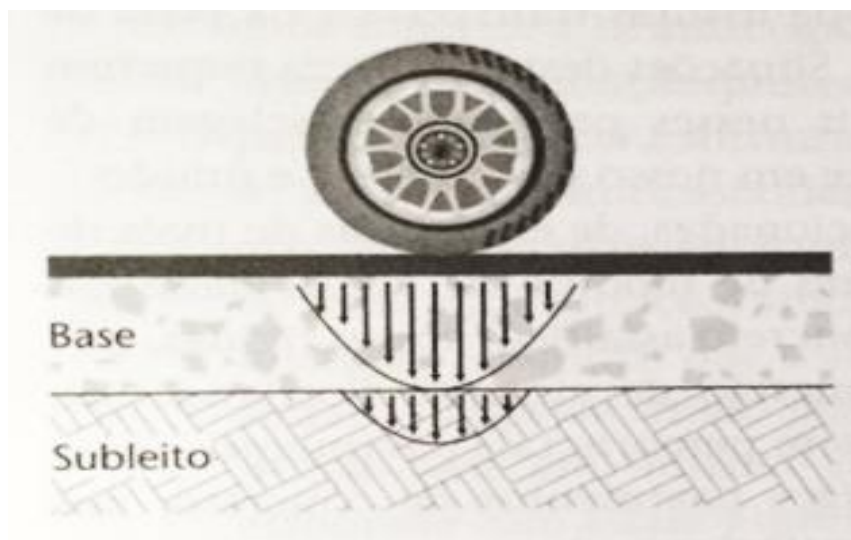
- Camada necessária quando o subleito possui baixa capacidade de carga.
- É utilizada para reduzir a espessura da sub-base.

f) Subleito

- Camada com espessura variável.
- Pode em alguns trechos não ocorrer.
- Deve ser executada sempre que possível em aterro (Greco)

A capacidade estrutural dos pavimentos flexíveis é fornecida pelas sucessivas camadas, pelas propriedades de resistência e rigidez de cada material nelas empregado. A camada estruturalmente mais importante é a base, que tem a função de receber as tensões do tráfego e distribuir os esforços antes de transmiti-los à sub-base ou ao reforço do subleito. As tensões imposta no pavimento flexível são muito concentrado, na região onde foi aplicada, conforme a Figura 5.

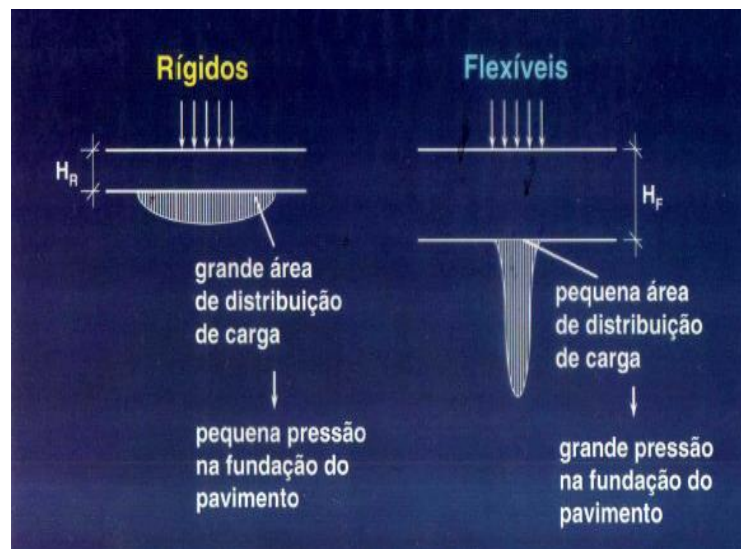
Figura 5 - Distribuição de cargas em pavimento flexível



Fonte: Balbo (2007)

De acordo com Balbo, enquanto uma dada carga atuante sobre um pavimento flexível impõe nessa estrutura um campo de tensões muito concentrado, nas proximidades do ponto de aplicação dessa carga, em um pavimento rígido, verifica-se um campo de tensões bem mais disperso, com os efeitos da carga distribuídos de maneira semelhante em toda a dimensão da placa, proporcionando menores magnitudes de esforços verticais (pressões) sobre o subleito (Figura 6).

Figura 6 - Comparação de distribuição de cargas entre pavimentos equivalentes



Fonte: Associação Brasileira de Concreto Portland (CPC – M3/4)

## 2.2 REVESTIMENTO

O revestimento é a camada superior do pavimento que se destina a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las às camadas inferiores. É a camada mais nobre do pavimento, por isso, sua execução deve ser precedida de detalhados ensaios de dosagem e acompanhada por rigorosos ensaios de controle (ADEBA, 2001)

Segundo Senço (2001), os esforços que atuam sobre o revestimento são os seguintes:

### a) Pressão de Impacto

- É o peso do veículo transmitido através das rodas, com o veículo parado, é a única pressão suportada pelo pavimento. No entanto, o veículo em movimento, acrescenta o fato de que a superfície de

rolamento não é perfeitamente lisa. Em consequência, ao esforço estático deve-se acrescentar o esforço dinâmico.

b) Esforços Tangencias (Horizontais)

- Tendem a deslocar os materiais da superfície do revestimento, desgastando-o. Trata-se de esforço abrasivo, devendo, portanto, o revestimento ter durabilidade para resistir a ele.
- Esses esforços podem ser longitudinais e transversais.

c) Esforços Longitudinais

- Desenvolvem-se no plano das rodas e são provocados pelas rodas motrizes.

d) Esforços Transversais

- Produzem-se perpendicularmente ao plano das rodas e são consequência da força centrífuga nas curvas.

e) Esforços de Sucção

- Surgem pelo efeito de sucção, devido à compressão das rodas de borracha sobre o revestimento, podendo, pela expulsão do ar, formar vácuo nos poros

Ainda de acordo com Senço (2001), a escolha do tipo de revestimento é uma questão econômica e técnica. Nem sempre é possível uma escolha baseada em fatores técnicos. Neste caso, principalmente, vários fatores influenciam na escolha do revestimento. Entre eles, pode citar:

a) Custo

- O primeiro passo na escolha do tipo de revestimento seria determinar, na base dos preços, o tipo que permita o serviço de transporte a custo unitário mais baixo. As comparações de custos podem levar aos preços relativos em determinada região. Nesta contingência, a escolha definitiva pode ser feita pelas características físicas do revestimento, ou por outras conveniências.

b) Características Físicas

- Cor: Tem certa relação com o conforto dos que dirigem veículos, os tipos que refletem a luz e brilham, ofuscando a vista, são menos recomendáveis do que os que tenham cores suaves e não brilhem.

- Aparência Geral: Depende do esmero do acabamento, essa consideração não é muito importante, mas deve ser levada em conta nas estradas, porque é a parte do pavimento que fica à mostra.
- Pó: O excesso da última camada de agregado provoca poeira, principalmente no serviço de tratamento superficial, esse fator deve ser levado em conta, pois deverá ser preferido em relação a outro, quando esse pó é indesejável.
- Facilidade de Limpeza: É propriamente uma parte que influência nas despesas de conservação.
- Segurança: Coeficiente de atrito do revestimento dá uma medida de sua contribuição para a segurança do tráfego. Um coeficiente de atrito elevado pode ser obtido combinando-se corretamente materiais adequados. Essa combinação deve ser meticulosa, pois excesso de ligantes transforma a pista numa superfície escorregadia, no caso do revestimento betuminoso.

Ainda segundo o autor, as imprimaduras e pinturas de ligação, ambas consistem na aplicação de uma camada de material asfáltico sobre a superfície da base concluída, antes da execução do revestimento. No caso das imprimaduras, a pintura betuminosa serve para aumentar a coesão da superfície da base pela penetração do asfalto, fixar as partículas eventualmente soltas nessa superfície, impermeabilizar a base, evitando a penetração de água, que pode atravessar o revestimento e promover condições de aderência entre a base e o revestimento. No que se refere à pintura de ligação, também chamada de imprimadura ligante, sua função específica é de promover aderência entre o revestimento asfáltico e a camada subjacente e impermeabilizar a base ou camada subjacente ao revestimento previsto (SENÇO, 2001).

### **2.2.1 Tipos de Revestimentos Asfálticos**

Os revestimentos asfálticos podem apresentar diversos tipos em pavimentos rodoviários. A seguir, serão apresentadas algumas características sobre cada um deles. De acordo com a Tabela 1.

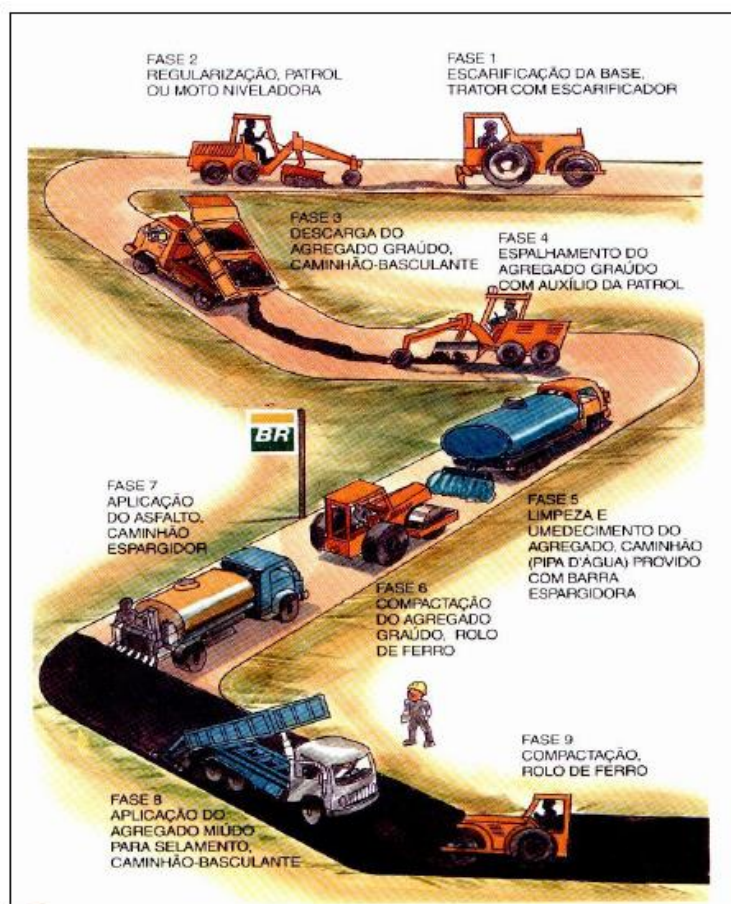
Tabela 1 - Tipos de revestimentos asfálticos empregados em pavimento de rodovias.

Revestimentos Asfálticos		
Por penetração	Macadame betuminoso	
	Tratamentos superficiais	Simples Duplo Triplo
		Concreto asfáltico
Por mistura	Misturas a quente	Pré-misturado a quente (PMQ)
		Areia asfalto a quente
		Pré-misturado a frio (PMF)
	Misturas a frio	Areia asfalto a frio Lama asfáltica

Fonte: Adaptado de Santana (1993)

- a) Macadame Betuminoso por penetração - O Macadame betuminoso é uma camada de pavimento realizada por intermédio de duas aplicações alternadas de ligante betuminoso sobre agregados. Os agregados utilizados têm dimensões e quantidades especificadas, devidamente espalhadas e compactadas, (Figura 7) DNIT 149/2010-ES. Os tipos de asfaltos utilizados devem ser: CAP 50/70, RR1C e RR-2C.

Figura 7 - Fases da construção do revestimento macadame betuminoso por penetração



Fonte: Nogueira (2013)

- b) Tratamentos Superficiais - Segundo Bernucci et al (2008), os tratamentos superficiais consistem em aplicação de ligantes asfáltico e agregados sem mistura prévia, na pista, com posterior compactação que promove o recobrimento parcial e a adesão entre agregados e ligantes. As principais funções do tratamento superficial são: proporcionar uma camada de rolamento de pequena espessura, porém, de alta resistência ao desgaste, impermeabilizar o pavimento e proteger a infraestrutura do pavimento, proporcionar um revestimento antiderrapante e de alta. O tipo de cimento asfalto de petróleo (CAP) que pode ser utilizado é o CAP 50/70, de asfaltos diluídos são: CR 250, CR800 e CM 30 e de emulsões asfálticas são: RR1C e RR2C.

De acordo com o número de camadas sucessivas de ligantes e agregados, o tratamento superficial pode ser classificado como:



- TSS – Tratamento superficial simples, camada de revestimento do pavimento constituída de uma aplicação de ligante betuminoso coberta por camada de agregado mineral, submetida à compressão, Figura 8 (DNIT 146/2012-ES).
- TSD – Tratamento superficial duplo, camada de revestimento do pavimento constituída por duas aplicações sucessivas de ligante betuminoso, cobertas cada uma por camadas de agregado mineral, submetidas à compressão (DNIT 147/2012-ES).
- TST – Tratamento superficial triplo, camada de revestimento do pavimento constituída por três aplicações sucessivas de ligante betuminoso, cobertas cada uma por camada de agregado mineral, submetidas à compressão (DNIT 148/2012-ES).

Figura 8 - Fases da construção do tratamento superficial simples (TSS)



Fonte: Nogueira (2013)

- c) Concreto Asfáltico - De acordo com DNIT, 31/2006-ES, o concreto asfáltico, é o mais nobre dos revestimentos flexíveis. Mistura executada a quente em uma usina apropriada, com características específicas, composta por agregados minerais graduados, material de enchimento e ligante betuminoso, espalhada e compactada a quente no local.

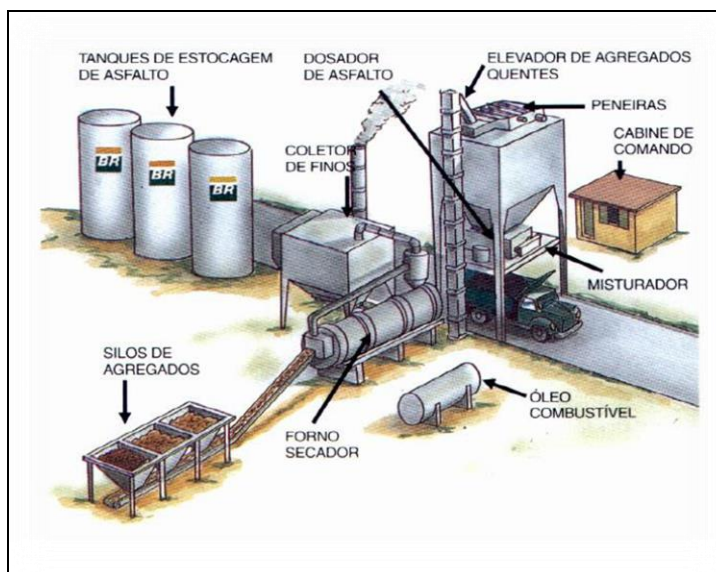
A granulometria do agregado pode ser classificada em três frações: agregado graúdo, agregado fino e filler. O agregado graúdo é constituído de pedra britada ou seixo rolado com pelo menos uma face britada, deverá ser constituída de fragmentos duráveis, livres de torrões de argila e matéria orgânica e ter uma boa adesividade com o asfalto utilizado. O agregado miúdo pode ser constituído de areia, pó de pedra ou mistura dos dois. Quanto ao filler, pode ser constituído, de cimento Portland, pó de pedra, pó de calcário e similares (SENÇO, 2001).

Os tipos de concreto asfáltico de petróleo (CAP) podem ser: CAP 30/45, CAP 50/70 e CAP 85/100. No preparo da mistura, o CAP deve ser aquecido a uma temperatura na qual a sua viscosidade Saybolt-Furol se enquadra na faixa de 75 a 150 SSF; a temperatura nunca deverá ser superior a 177°C, para evitar o fenômeno de craqueamento. Os agregados são aquecidos a temperaturas de 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante asfáltico, sem ultrapassar 177°C (SENÇO, 2001).

O uso de concreto asfalto é muito difundido na França e, atualmente, também nos Estados Unidos. Esses concretos asfálticos recebem o nome de misturas de módulo elevado (EME) por apresentarem módulo de resistência elevado e também elevada resistência à deformação permanente. Possuem curvas granulométricas próximas à de máxima densidade, maximizando a resistência ao cisalhamento e minimizando os vazios. Não são empregadas como camada de rolamento devido à textura superficial muito lisa resultante, dificultando a aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Sobre essas camadas de EME, como camadas de rolamento são empregados em geral revestimento delgados com a finalidade exclusivamente funcional (BERNUCCI et al, 2008).

O concreto asfáltico é produzido em usinas próprias, cujo desenvolvimento tecnológico vem apresentando melhorias substanciais, a cada ano que passa. São dois tipos de usinas a considerar: usina gravimétrica (Figura 9) e usina volumétrica (Figura 10).

Figura 9 - Usina Gravimétrica



Fonte: Nogueira (2013)

- d) **Pré-Misturado a Quente** - O pré-misturado é uma mistura executada a quente, em usina apropriada, de um ou mais agregados minerais e cimento asfalto de petróleo (CAP), espalhado e comprimido a quente. Pode ser utilizado como camada de regularização, como base de pavimento ou como revestimento (DNIT 386/99-ES).

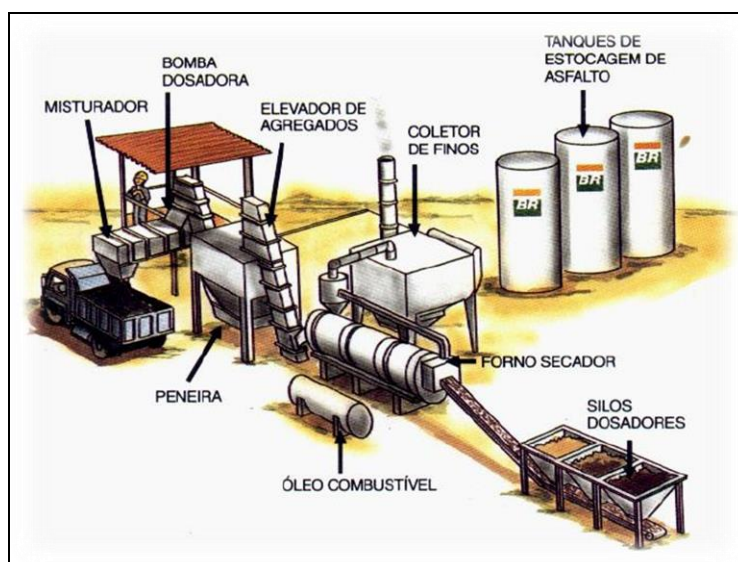
Os agregados graúdos devem constituir-se por pedra britada, ou seixo rolado britado, apresentando partículas sãs, limpas e livres de torrões de argila. O agregado miúdo é constituído por areia, pó de pedra ou a mistura de ambos. O material de enchimento deve ser de natureza mineral, tal como: cimento Portland, cal, cinzas volantes e outros. O que diferencia entre o concreto asfáltico e o pré-misturado a quente resume-se num diferencial de qualidade, o concreto asfáltico tem um maior rigor nas especificações e no controle da dosagem em relação ao pré-misturado a quente.

Segundo Senço (2001), o pré-misturado a quente é aplicado em espessuras que variam de 3 a 10 cm, de camada acabada, essas espessuras definem, numa razão direta, a utilização de agregados mais finos até os mais graúdos. A liberação do tráfego deve ser permitida quando o pré-misturado já estiver atingindo a temperatura ambiente, o que deve ocorrer após seis horas da execução.

As usinas que podem ser usadas são: usina gravimétrica (Figura 9) e usina volumétrica (Figura 10). Quanto à execução, na operação da usinagem, o agregado deve ser aquecido a uma temperatura 10 a 15°C acima da temperatura do concreto asfáltico, sem ultrapassar 177°C. A mistura deve ter uma sua temperatura variando entre os limites de 107 e 177°C (SENÇO, 2001).

Os asfaltos utilizados deverão ser dos tipos: CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. A temperatura de aquecimento desses asfaltos é objeto de fixação previa. Essa temperatura deve ser correspondente à viscosidade Saybolt-Furol de 75 a 150 segundos (SENÇO, 2001).

Figura 10 - Usina volumétrica.



Fonte: Nogueira (2013)

- e) Areia Asfalto a Quente - É uma mistura a quente, em usina apropriada, de areia ou resíduo de britagem, com ou sem material de enchimento (Filler) e cimento asfáltico de petróleo (CAP). São misturados em proporções convenientes e devidamente compactados.

De acordo com o DNIT 032/2004 - ES, o agregado é a areia. Suas partículas individuais devem ser resistentes, em seus grãos, estando livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. O agregado deverá ainda apresentar um valor igual ou inferior a 55 %, no ensaio de equivalente areia (DNER - ME 054). O material de enchimento deve ser constituído por materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta e etc.

O material betuminoso deverá ser um cimento asfáltico de petróleo, de um dos tipos: CAP 50/70 ou CAP 85/100. A usina tem que ser gravimétrica ou volumétrica. A areia-Asfalto a quente somente deverá ser fabricada, transportada e aplicada quando a temperatura ambiente for superior a 10° C e a abertura do tráfego deverá aguardar o resfriamento da mistura compactada.

Segundo Bernucci et al (2008), a areia usinada a quente é normalmente empregada como revestimento de rodovias de tráfego não muito elevado. Como toda mistura a quente, tanto o agregado quanto o ligante são aquecidos antes da mistura e são aplicados e compactados a quente. Essas misturas, devido à elevada quantidade de ligante asfáltico e presença de agregados de pequenas dimensões, requerem muito cuidado na execução. Um dos problemas mais frequentes dessas misturas é que comumente apresentam menos resistência às deformações permanentes, comparadas às outras misturas usinadas a quente.

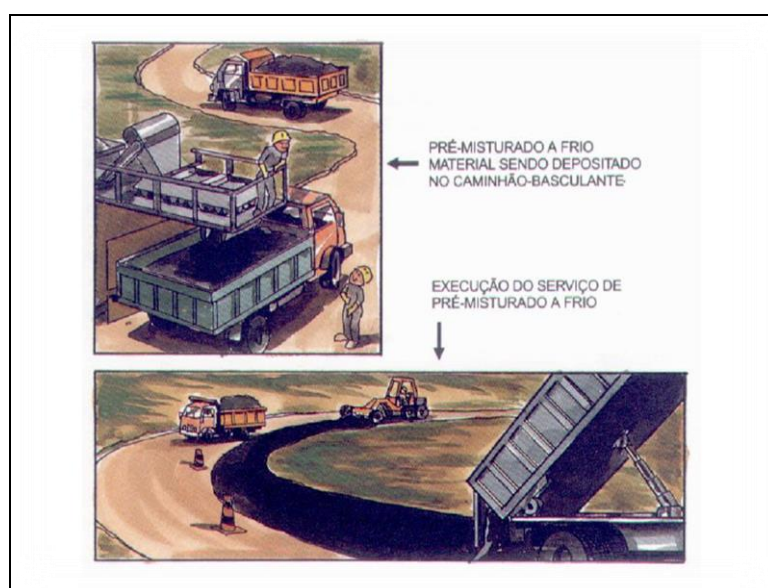
- f) Pré-Misturado a Frio (PMF) - É uma mistura executada à temperatura ambiente em usina apropriada, composta de agregado graúdo, material de enchimento (filler) e de emulsão asfáltica, espalhada e comprimida a frio. O agregado pode ser pedra ou seixo britados, duráveis, livres de torrões de argila e substâncias nocivas. O agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos (DNIT 153/2010 - ES).

O PMF pode ser elaborado com diferentes distribuições granulométricas de agregados, resultando em misturas mais abertas: graduação aberta, com elevado volume de vazios; e densos: graduação contínua e bem-graduado, com baixo volume de vazios.

Quando o PMF é aberto, seu índice de vazios pode chegar a 20%, resultando neste caso, em material bastante drenante. Tal característica reporta à necessidade de cuidados especiais com a mistura: a camada inferior ao PMF deverá estar bem selada (ou mesmo ser fechada) para impedir a descida de água para camadas subjacentes, sendo então necessário que o PMF se estenda até a borda do acostamento para ocorrer drenagem lateral da água. O material das misturas abertas terá resistência basicamente provida pelo esforço de compactação, devido ao atrito interno entre os agregados; o ligante é capaz de promover uma coesão mínima entre os grãos. São especialmente indicados como camadas de base ou de regularização para um pavimento existente (BERNUCCI et al, 2008)

O pré-misturado a frio pode ser usado como base, regularização, reforço de pavimentos ou revestimentos de ruas e estradas de médio e baixo volume de tráfego. As camadas dos PMF podem variar entre 30 a 70mm de espessura compactada, dependendo do tipo de serviço e da granulometria da mistura. As camadas devem ser espalhadas e compactadas à temperatura ambiente em dias não chuvoso. A Figura 11 ilustra as fases da construção do revestimento Pré-misturado a frio.

Figura 11 - Execução de um revestimento utilizando Pré-misturado a frio



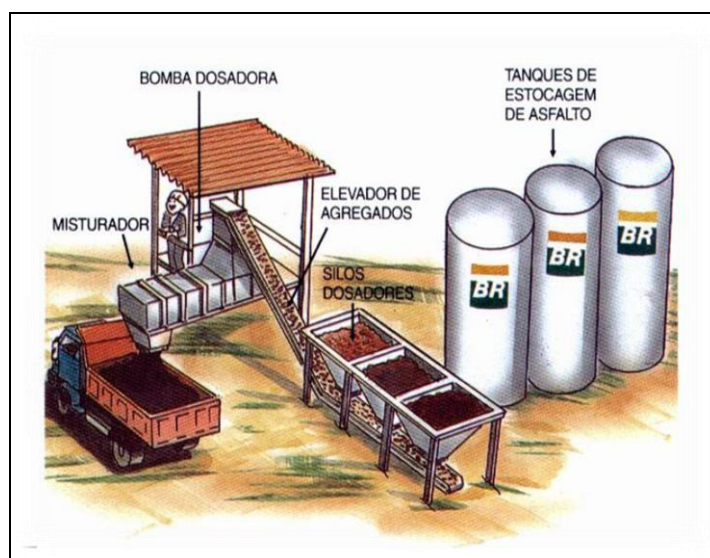
Fonte: Nogueira (2013)

As vantagens da técnica de mistura a frio estão ligadas principalmente ao uso de equipamentos mais simples, trabalhabilidade à temperatura ambiente, boa adesividade com quase todos os tipos de agregado britado, possibilidade de estocagem e flexibilidade elevada.

Existe uma grande variedade de usinas fabricadas exclusivamente para a elaboração de pré-misturados a frio, como misturadoras do tipo pugmill, com dosadoras de agregados, o que permite a fabricação de misturas contínuas ou descontínuas. Usinas misturadoras de solos e agregados podem ser também empregadas sem maiores dificuldades, além das próprias usinas para a produção de concreto asfáltico. A Figura 12 mostra uma tradicional usina de pré-misturado a frio.



Figura 12 - Usina de Pré-Misturado a Frio



Fonte: Nogueira (2013)

Um PMF não apresentará, após sua execução, idênticos padrões mecânicos de um concreto asfáltico. Apesar disso, o ganho de resistência mecânico do material ocorre ao longo do tempo. No exterior, este material vem ganhando maior campo de aplicações no caso da reciclagem de antigos revestimentos asfálticos fresados.

No Brasil, além da utilização como camadas de pavimentos, é muito frequente sua aplicação como material para a execução de serviços de manutenção em vias urbanas e mesmo em rodovias (tapa-buracos).

- g) Areia Asfalto a Frio (AAF) - É o produto resultante da mistura, em equipamento apropriado, de emulsão asfáltica catiônicas, agregado miúdo, com a presença ou não de material de enchimento (filler), espalhado e compactado a frio. Este tipo de serviço se aplica na regularização – camada final de um revestimento asfáltico e serviços do tipo tapa-buracos em vias de baixo volume de tráfego. A espessura final de uma camada de areia-asfalto a frio não deve ser superior a 40 mm (ADEBA, 2001).

Areia asfalto a frio, também chamado de argamassas a frio, são carentes de agregados graúdos. Podem ser usados: areia, pedrisco, pó de pedra, pó de escória ou combinação deles. Nesse caso é importante usar emulsão de ruptura lenta que tenha por base asfaltos mais consistentes para melhorar as características

mecânicas da AAF (ADEBA, 2001).

- h) Lama Asfáltica - As lamas asfálticas consistem de uma associação, em consistência fluída, de agregados minerais, material de enchimento ou fíler, emulsão asfáltica e água, uniformemente misturadas e espalhadas no local da obra, à temperatura ambiente (DNIT 150/2010-ES).

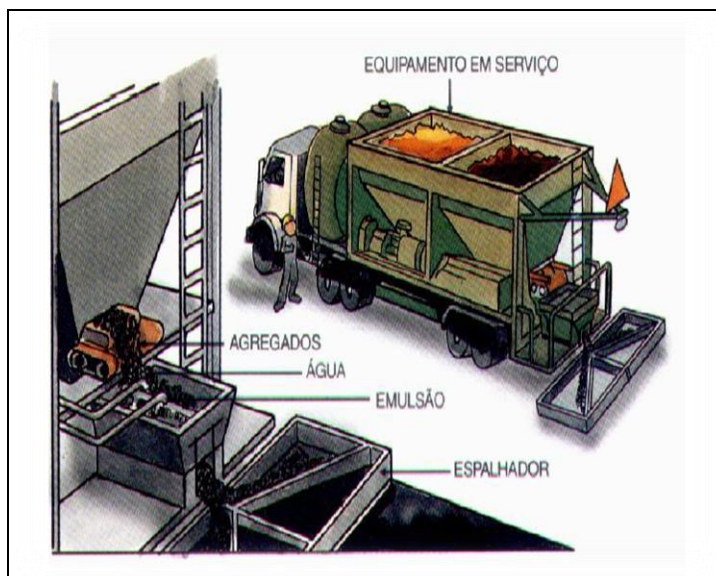
Essas misturas são argamassas pré-misturas que possuem cerca de 40% de pedrisco, sendo normalmente elaborados com emulsões de asfaltos modificados com polímeros.

Segundo Bernucci et al (2008), a lama asfáltica tem sua aplicação principal em manutenção de pavimentos, especialmente nos revestimentos com desgaste superficial e pequeno grau de trincamento, sendo nesse caso, um elemento de impermeabilização e rejuvenescimento da condição funcional do pavimento. Aplica-se especialmente em ruas e vias secundarias. Eventualmente ainda é usada em granulometria mais grossa para repor a condição de atrito superficial e resistência à aquaplanagem. Outro uso é como capa selante aplicada sobre tratamentos superficiais envelhecidos. No entanto, a lama asfáltica, não corrige irregularidades acentuadas nem aumenta a capacidade estrutural, embora a impermeabilização da superfície possa promover em algumas situações a diminuição das flexões devido ao impedimento ou redução de penetração de água nas camadas subjacentes ao revestimento.

Ainda de acordo com o autor, a lama asfáltica é processada em usinas especiais móveis que tem um silo de agregado e um de emulsão, em geral de ruptura lenta, um depósito de água e um fiiler, que se misturam proporções preestabelecidas imediatamente antes de serem espalhadas através de barra de distribuição de fluxo contínuo e tanto quanto possível homogêneo, em espessuras delgadas de 3 a 4mm, sem compactação posterior. A Figura 13 ilustra como é preparada a lama asfáltica.



Figura 13 - Execução da Lama Asfáltica



Fonte: Nogueira (2013)

### 2.2.2 Asfalto Pré-Misturado a Frio

O asfalto pré-misturado a frio é uma mistura preparada, em usina apropriada, calibrada com agregado graúdo acompanhado ou não de agregado miúdo e filler, espalhada e compactada na pista a temperatura ambiente e nunca inferior a 10°C e em dias não chuvosos. A destinação é voltada a revestimentos, base, regularização, ou reforço de pavimentos e operação tapa-buracos (DNIT 153/2010-ES).

Segundo Abeda (2001), a facilidade com que se pode obter a massa asfáltica, bem como sua aplicação na pista com vibroacabadora e até com motoniveladora, faz com que essa alternativa ganhe espaço em muitas prefeituras que querem pavimentar ruas e não dispõem de grandes recursos financeiros e equipes técnicas.

Nos Estados Unidos, os departamentos de transporte, até hoje, demonstram pouco interesse na utilização de misturas a frio com emulsão asfáltica como alternativa às misturas a quente em áreas de tráfego intenso ou onde há usinas de mistura a quente disponível. Isso é uma consequência das limitações das misturas a frio com respeito às condições climáticas e de lenta cura. Entretanto, em áreas rurais, onde não há usinas de mistura a quente e onde altos custos de transporte de combustível e outros materiais seriam esperados, asfalto pré-misturado a frio oferecem boas vantagens (AIKMAN, 2006).

Os PMFs podem ser usados em camada de 30 a 70mm de espessura de espessura compactada, dependendo do tipo de serviço e da granulometria da mistura, espessuras maiores devem ser compactadas em duas camadas. As camadas devem ser espalhadas e compactadas à temperatura ambiente (BERNUCCI et al, 2008).

As principais vantagens da utilização da técnica de pré-misturados a frio, segundo Abeda (2001), estão ligadas a utilização de equipamento simples, alta produtividade, trabalhabilidade à temperatura ambiente, elevada capacidade de suportar às grandes deflexões das camadas subjacentes, reduzida emissão de gases tóxicos e/ou poluentes e baixo consumo de energia térmica e elétrica envolvida durante as operações de transporte, manuseio, estocagem e aplicação dos materiais.

A maior desvantagem do uso de misturas a frio com emulsões asfálticas é o lento desenvolvimento de resistência, fenômeno controlado pela perda de umidade da mistura. A estabilidade última, assim como propriedades finais, não é alcançada até que toda água da mistura tenha evaporado.

A utilização de misturas a frio vem sendo cada vez mais difundida no meio técnico mundial como solução alternativa na execução de bases e revestimentos asfálticos, graças à sua simplicidade e rapidez de execução a frio. No Brasil, seu maior emprego ainda se destina à execução de camada de regularização e reforço da estrutura do pavimento (binder) e de serviços rotineiros de conserva “tapa buracos” (ADEBA, 2001).

### **2.2.3 Histórico do PMF**

Os pré-misturados a frio (PMFs) começaram a se desenvolver nos Estados Unidos na década de 50, com ênfase na Costa do Pacífico em 1964, na forma de graduação mais aberta, inicialmente em bases e em seguida em revestimentos (recebendo um Tratamento Superficial Simples – TSS).

No Brasil, a partir de 1966, o PMF começou a ser utilizado em escala industrial para camadas de regularização e reforço, na restauração da primeira pista da Rodovia Presidente Dutra (Rio / São Paulo BR-166).

No fim da década de 60 e durante a de 70, os PMFs foram largamente utilizados como camadas de regularização, reforço, base e binder nas principais rodovias do país, e em menos escala como revestimento.

Em 1980 já se havia empregado somente em rodovias federais cerca de 3.500.000t de massa de PMFs, uma extensão real de 1.000km, correspondente a cerca de 5.000km com  $h = 5\text{cm}$ .

Na década de 80 houve uma retração no volume de obras rodoviárias federais, mas em contrapartida um grande aumento de revestimentos (3 a 5cm) de PMF em obras estaduais. Em 1990 estima-se ter empregado em rodovias brasileiras 10.500.000t de massa de PMFs, correspondentes a cerca de 15.000km em termos de  $h=5$

O asfalto pré-misturado a frio ainda é muito utilizado no Brasil, e pode-se afirmar que, de modo geral, a experiência brasileira sobre os PMFs foi positiva. Houve naturalmente, muitas falhas de execução e de controle tecnológico, aliada principalmente à falta frequente de um simples projeto de drenagem superficial.

#### 2.2.4 Definições e Classificações dos Pré-Misturados a Frio

De acordo com Abeda (2001), a classificação do pré-misturado a frio (PMF) envolve a granulometria (quantidade de argamassa e de agregados) e a quantidade de vazios. Tradicionalmente, os PMFs são classificados em três classes quanto a seu volume de vazios, como pode ser analisada a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do PMF	
Denominação	% Vazios
Aberto	22 a 30
Semi Densos	15 a 22
Densos	5 a 15

Fonte: ADEBA (2001)

- a) Pré-Misturado a Frio Aberto (PMFA) - É o PMF com pequena ou nenhuma quantidade de agregado miúdo e com muito pouco ou nenhum filler, ficando após a compactação com um grande teor de vazios.

- b) Pré-Misturado a Frio Semi-Denso (PMFsD) - É o PMF com quantidade média de agregado miúdo e com pouco ou nenhum filler, ficando após a compactação com um médio teor de vazios.
- c) Pré-Misturado a Frio Denso (PMFD) - É o PMF com quantidade apreciável de agregado miúdo, podendo ou não conter filler até com alto teor, ficando após a compactação com um teor de vazios relativamente baixo (SANTANA, 1993).

De acordo com Santana (1993), o PMF tendo obrigatoriamente agregado graúdo, exclui misturas como Areia-Asfalto e Lama-Asfalto. Podendo ser usada em revestimentos e bases. As misturas a frio exigem mais vazios que as misturas a quente, pois, após a compactação, é necessário que haja a evaporação da água e do solvente (caso haja) e com a liberação do tráfego, haverá uma maior diminuição no volume de vazios das misturas a frio do que nas misturas a quente.

As emulsões de ruptura média são responsáveis pela produção das misturas de PMF do tipo abertas, que de acordo com as normas brasileiras, o agregado graúdo tem um diâmetro máximo de 25, 4mm. Esse tipo de mistura asfáltica pode ser aplicado como camada de revestimento ou camada intermediária. Como camada de rolamento apresenta a vantagem de elevada rugosidade, o que permite uma excelente aderência pneu/pavimento, aumentando à segurança a derrapagem. Como camada intermediária ou de transição, pode servir de ligação, aumentando a resistência estrutural da camada (ABEDA, 2001)

Segundo Abeda (2001), o PMF aberto, devido à facilidade de produção, estocagem (em geral, até 30 dias, desde que devidamente estocado em pilhas e protegido com lonas impermeáveis), transporte, aplicação e manuseio no campo, é uma excelente solução para vias de tráfego leve e médio. Essas características proporciona flexibilidade na programação do serviço, ou seja, pode-se priorizar a fase de produção da massa asfáltica e, posteriormente, a aplicação na pista. Além disso, apresenta a vantagem de liberação imediata da camada executada ao tráfego, permitindo a construção da obra por etapas.

As emulsões de ruptura lenta são responsáveis pela produção de PMF do tipo denso, com aparência do concreto asfáltico a quente. Devido ao baixo índice de vazios, este revestimento apresenta excelente comportamento estrutural e funcional

para vias de médio volume de tráfego, conferindo bom desempenho tanto do ponto de vista mecânico como de acabamento da superfície, proporcionando excelente conforto ao rolamento. Recomenda-se estocagem do PMF denso por no máximo sete dias. Os trabalhos só devem ser conduzidos quando as condições ambientais forem apropriadas, isto é com temperatura ambiente acima de 10°C e tempo estável, sem chuvas (ADEBA, 2001).

Os valores numéricos da porcentagem dos volumes de vazios deverão ser utilizados o Método Marshall – DNER - ME 107/94. Esse método foi adaptado para misturas a frio sendo conhecido como Marshall Modificado (DNIT 153/2010 - ES).

### 2.3 ASPECTOS FUNCIONAL, ESTRUTURAL E HIDRÁULICO DOS PMFS

Para uma melhor compreensão do assunto, é interessante resumir o que é considerado como a melhor mistura asfáltica que se possa produzir, conhecido no Brasil como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) ou simplesmente Concreto asfáltico (CA).

Segundo Santana (1993), o CBUQ verdadeiro, no sentido apresentado de a melhor mistura, deve apresentar as seguintes principais características:

- Máxima impermeabilidade ao ar e a água, sem exudação.
- Estabilidade e resistência à fadiga satisfatória para qualquer valor do número N no prazo máximo de 30 anos
- Características superficiais (no caso de revestimento) de conforto e segurança ao usuário.

A estabilidade do CBUQ é função do atrito interno (fornecido principalmente pelo agregado graúdo), e da coesão da argamassa que é muito sensível aos teores de CAP e filler. O fenômeno da chamada fadiga clássica é comandada pelo comportamento do mástique (filler ativo disperso no CAP), que após sofrer solicitações repetidas acaba por trincar, o que é acelerado pelo envelhecimento do CAP em serviço.

Nas misturas a frio, os PMFs com pouquíssima argamassa e com alto teor de vazios, chamados de Pré-Misturados a Frio Abertos (PMFAs) têm um comportamento bem diferente do CBUQ. Sua estabilidade é devido ao atrito entre suas partículas, com uma pequena ajuda da coesão desenvolvida pela película de

CAP que as envolve (VIEIRA, 2009).

Os PMFAs, não sofrem o modelo clássico de fadiga, desde que praticamente não existe argamassa, o ligante sendo CAP e não o mástique, a ruína se dando principalmente por desagregação provocada pela abrasão do agregado graúdo (VIEIRA, 2009). Devido o grande volume de vazios, o CAP endurece rapidamente, principalmente nas camadas de revestimento, baixando a penetração, aumentando a viscosidade e o módulo de rigidez (MR), sem, entretanto, provocar trincas de fadiga, e apenas em climas muito frios provocando poucas trincas de retração.

A exudação pode ocorrer devido à película de CAP muito espessas, e nunca devido a uma migração do CAP por falta de vazios, como ocorre no CBUQ.

Aumentando-se moderadamente no PMFA a quantidade de argamassa e filler e diminuindo um pouco o teor de vazios, obtém-se os chamados Pré-Misturados a Frio Semi-Denso (PMFsD), cuja o comportamento da fadiga ainda é idêntico ao dos PMFAs, mas já há argamassa suficiente para ficar crítico o teor de ligante para a estabilidade, sendo necessário um método de dosagem (Ensaio Marshall a Frio).

Os PMFs com quantidade já apreciável de argamassa com filler e limitado teor de vazios, deu-se o nome de Pré-Misturados a Frio Densos (PMFDs), que já apresentam comportamento parecido com o CBUQ, no que diz respeito à fadiga e à estabilidade, sendo necessário dosá-los por um método tipo Marshall (VIEIRA, 2009).

Resumidamente, Santana (1993) explica cada tipo de PMFs.

- PMFA
  - para  $N \leq 2 \times 10^6$ , usar em revestimento, dosando em função da superfície específica, não sendo necessária a verificação de fadiga e da estabilidade, necessita de capa selante.
  - para  $N \leq 2 \times 10^7$ , usar em binders e bases (exceto capa selante).
- PMFsD – segue-se as mesmas restrições dos PMFs abertos, fazendo-se a dosagem por algum método consagrado (por exemplo, o método Marshall)
- PMFD – para  $N \leq 2 \times 10^7$ , usar somente em revestimento, efetuando a dosagem e levando em conta a fadiga, não necessita da capa selante.

No ponto de vista hidráulico, observa-se a correlação entre a porcentagem de volumes vazios e a permeabilidade. É usual considerar que misturas com

porcentagem de volume de vazios:

- $\leq 12 \%$  Apresentam baixa permeabilidade, não necessitando da capa selante.
- $> 12 \%$  Oferecem alta permeabilidade, necessitando da capa selante.
- $> 20 \%$  Considerada especialmente como camada drenante.

Vários trabalhos e estudos vêm sendo realizados com PMFs na tentativa de melhorias e entender melhor o seu comportamento ao longo de sua vida útil. Uma das mais importantes pesquisas foi realizada pela Oregon State University (OSU), onde foram levantadas segmentos de rodovias com revestimento em PMFs.

Entre 1976 e 1986, nos Estados de Oregon e de Washington (Costa Noroeste do Pacífico – Estados Unidos), a “Oregon State University” (OSU) realizou uma pesquisa sobre os pré-misturados a frio abertos. Os estudos foram feitos em intervalos de cinco anos nos mesmo segmentos (237km de segmentos), representam mais de 8.000 km de rodovias, e as datas de construção dos segmentos tinham variação de 1 ano até 19 anos. O tráfego variou de 250 veículos/dia até 4000 veículos/dia.

As espessuras de 5cm até 20cm constituída por uma mistura de graduação aberta com Emulsão Catiônica (OGEM – Open Grade Emulsion Mixes).

Após 10 anos, os resultados demonstraram que quanto à qualidade de rolamento, 52% dos segmentos tem avaliação “Muito Boa”, quanto as trincas, 40 % não apresentou nenhuma, e os 60% restantes era trincas de retração com pouquíssima trincas de fadiga, e na avaliação global, 53% dos segmentos foram considerados “Muito Bom” e 31% “Boa”.

Além das qualidades já apresentadas, os pesquisadores deram ênfase que, analisando os resultados, as OGEMs obtiveram comportamento igual ou superior às misturas a quente (Santana 1993).

### 3. MATERIAIS E EXECUÇÃO

O bom desempenho de revestimentos asfálticos depende da utilização de procedimentos corretos em diversas etapas: projeto, escolha adequada de materiais e misturas que atendam os condicionamentos de uso do revestimento, técnicas adequadas de produção, distribuição e execução das camadas asfálticas na pista. Esse tópico trata da dosagem e da produção das misturas em usinas, do transporte e distribuição na pista das misturas asfálticas, das técnicas de densificação e acabamento, assim como de algumas técnicas de controle executivo.

#### 3.1 MATERIAIS

A emulsão utilizada no Pré-Misturado a Frio, geralmente é a catiônica, de ruptura média ou lenta. A ruptura média utiliza emulsões dos tipos: RM-1C e RM-2C que é empregada em pré-misturados abertos, e o que diferencia o RM-1C do RM-2C é grau do teor de asfalto.

A emulsão da ruptura lenta é do tipo RL-1C, empregada em pré-misturado semi-densos e densos. Se requerido no projeto, o ligante asfáltico pode ser modificados emulsionados, por motivos técnicos-econômicos poderão ser utilizados emulsões asfálticas tipo LA, LA-C e LA-E. (DNIT 153/2010 - ES)

As principais características dos outros materiais, constituintes do pré-misturado a frio segundo Abeda (2001) são:

- Agregado Graúdo: rochas britadas, escória britada, cascalhos britados ou não, fragmentos sãos, livre de torrões substâncias nocivas e boa adesividade aos ligantes asfálticos.
- Agregado Miúdo: pó de pedra, areia lavada de rio (exceto areias de barranco) ou mistura de ambos, apresentando forma e resistência adequada, sem torrões de argila e outras impurezas. A quantidade máxima de areia admitida é de 20% sobre o total de agregados.
- Material de Enchimento (filler): materiais minerais de granulometria



conhecida e isento de argilas ou outras impurezas, tais como cimento Portland, cal extinta ou pó calcário.

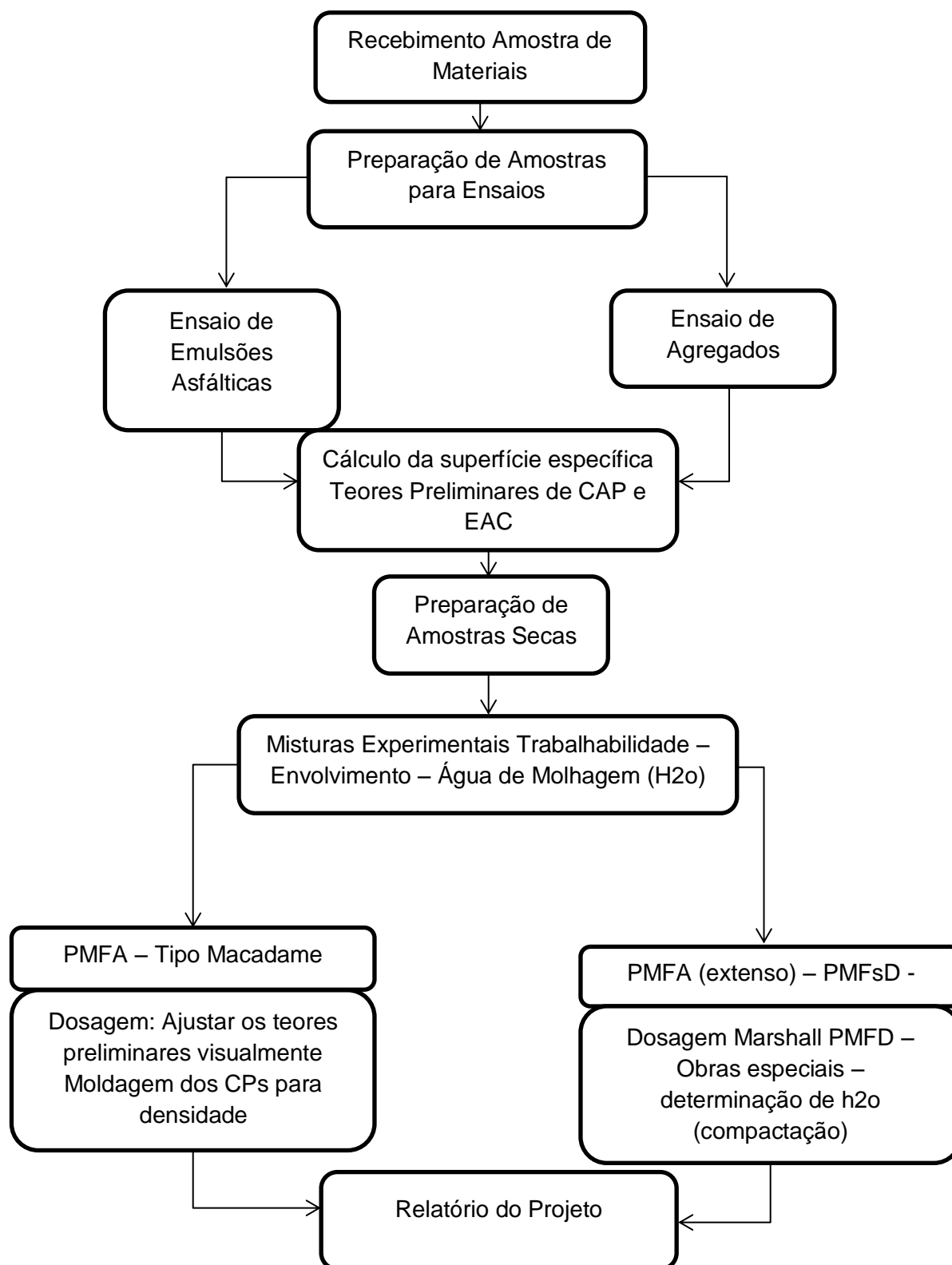
A dosagem utilizada no pré-misturado a frio é realizada segundo o método de ensaio de Marshall modificado, especificado na norma DNER-ME 107/94. A dosagem dos PMFs iniciam-se com o cálculo dos teores de emulsão asfáltica.

Outro método utilizado é dos fatores correlativos da superfície específica de Duriez (SANTANA, 1993) que se baseia no cálculo da superfície específica dos agregados a partir da proporção dos diversos tamanhos das partículas.

Para Bernucci et al (2008), o processo de cura das misturas a frio ainda não é perfeitamente compreendido. Este fator tem importância maior quando se verifica que não há um consenso entre os métodos de dosagem de misturas a frio com relação ao grau e ao método de cura que devem ser considerados como representativo do processo que ocorre em campo.

As etapas do processo de mistura foram detalhadas no fluxograma de acordo com a Figura 14, observa-se que a preparação dos agregados para a mistura deve ser utilizada seca, com o objetivo do controle da água de molhagem para a realização da dosagem de Marshall.

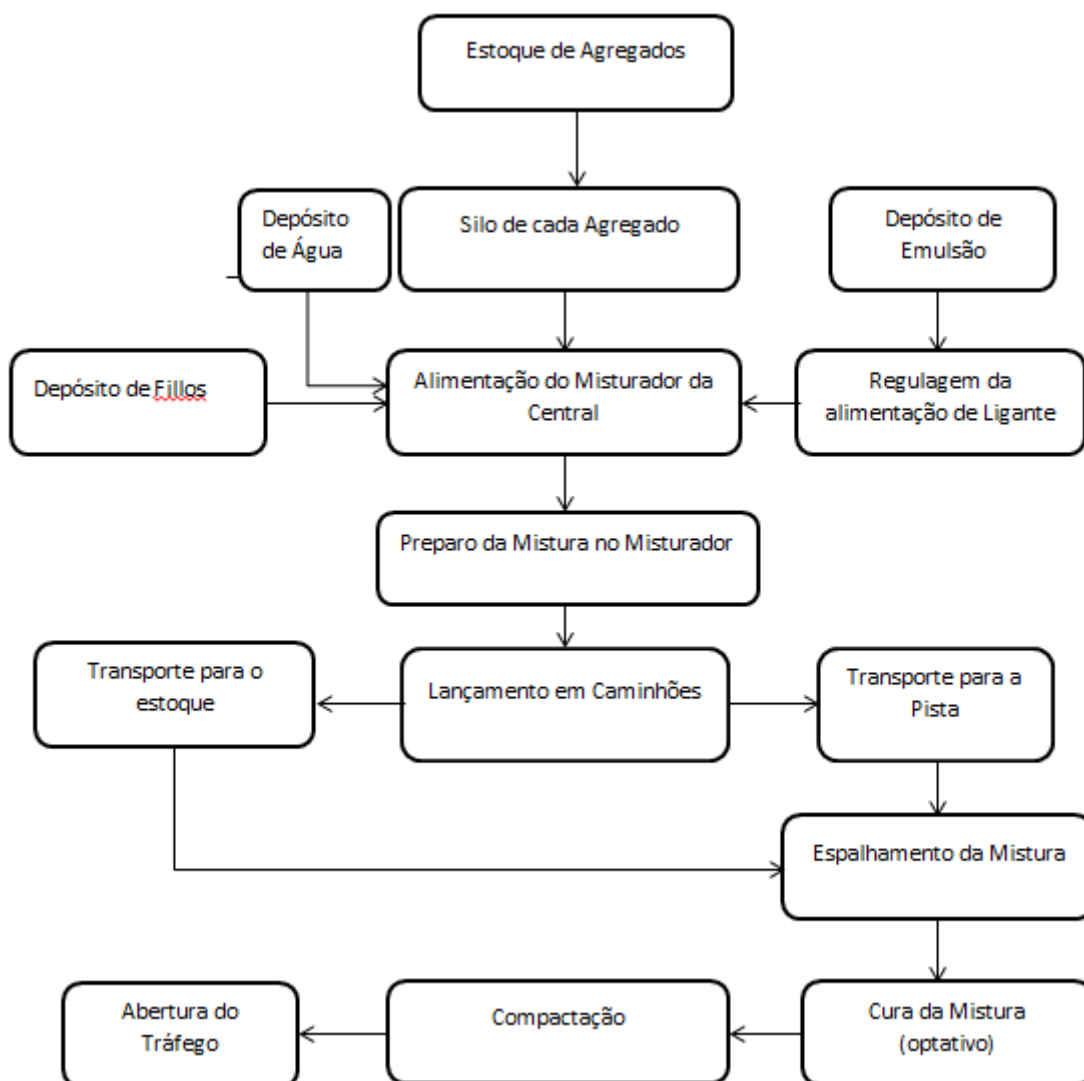
Figura 14 - Fluxograma do projeto da mistura de um PMF



### 3.2 PROCESSO EXECUTIVO

As etapas da construção de um pré-misturado a frio são bem conhecidas no Brasil. O fluxograma apresentado na Figura 15 apresenta a ordem das instruções para a confecção de uma camada de PMF de forma bem resumida.

Figura 15 - Processo de construção de uma camada de PMF



Fonte: Santana (1993)

De acordo com o fluxograma do processo de construção de uma camada de pré-misturado a frio apresentado na Figura 15, à dosagem deve ser acompanhada das especificações gerais do projeto de pavimentação. Assim, pode-se proceder aos serviços de construção do pavimento, que podem ser subdivididos em quatro

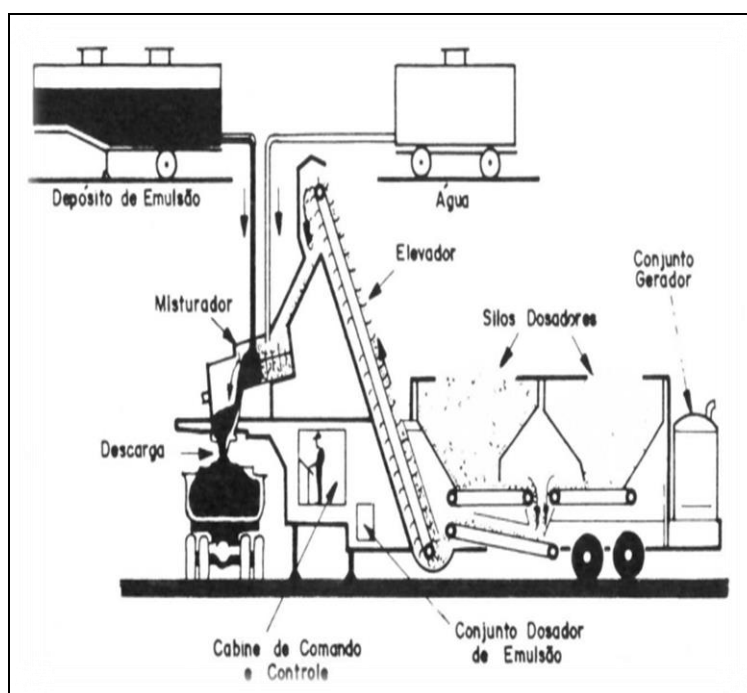
categorias: mistura, transporte, espalhamento e compactação (VIEIRA, 2009).

### 3.3 MISTURA

As misturas dos agregados com emulsão asfáltica é processada em usinas mecânicas que podem ser estacionárias ou moveis, com a capacidade de produção variando entre 30tf/h a 600tf/h. Essas usinas são mais simples por não terem a necessidade de aquecimento do agregado nem do ligante (ADEBA, 2001).

As usinas estacionárias utilizadas são as mesmas empregadas na produção de misturas de solos, britas, solo-cimento e etc. A que possui maior capacidade de produção, têm silos individuais para os agregados que descarregam em uma correia transportadora que os conduz ao misturador, onde é injetada a emulsão asfáltica. A Figura 16 apresenta um exemplo de usina estacionária.

Figura 16 - Esquema de uma usina estacionária para produção de mistura a frio



Fonte: Santana (1993)

Em relação à saída do misturador, que é descarregada no caminhão, deve-se colocá-la a 3 metros de altura em relação ao solo.

Conforme relatado anteriormente, durante a operação de uma usina é importante cuidar da umidade dos agregados e o teor da água de molhagem, o teor

de emulsão, a qualidade do processo de mistura e da segregação.

As usinas do tipo móvel são montadas sobre um chassi único e devido à sua funcionalidade podem ser colocadas em operação em poucas horas (Figura 17). Esse tipo de usina trazem grandes vantagens econômicas, por possuírem mistura e espalhamento em uma só operação. A desvantagem é de não possuir um controle intermediário entre as etapas, fato que não permite correções a fim de minimizar problemas.

Figura 17 - Exemplo de usina de pré-misturado a frio móvel



Fonte: Bernucci et al (2008)

### 3.4 TRANSPORTE E LANÇAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

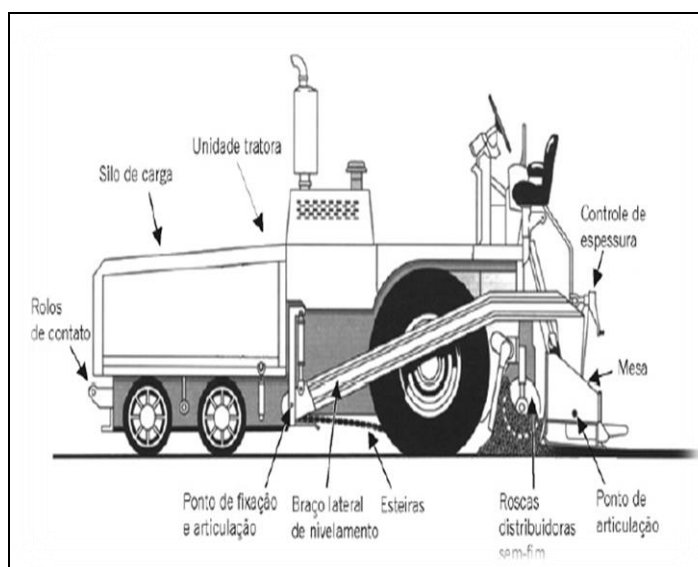
O transporte normalmente é feito em caminhões basculantes, com a tampa traseira perfeitamente vedada, de modo a evitar o vazamento de emulsões sobre a pista. É recomendável que o caminhão possua dois dispositivos para retenção de líquidos no interior da caçamba, e posterior remoção (VIEIRA, 2009). O número de caminhões necessário é determinado pelos fatores da velocidade de produção da mistura asfáltica na usina, a distância de transporte, o tipo de tráfego no percurso e o tempo estimado para descarregamento.

O lançamento da mistura asfáltica e o início de um serviço de compactação de uma camada de revestimento asfáltico devem ser procedidos por um planejamento onde são considerados detalhes importantes no processo, como:

continuidade e sequência de operações, quantidade necessária de máquinas, condições climáticas e de temperatura e controle do tráfego (ROCHA, 2014).

A mistura asfáltica deve ser lançada em camada uniforme de espessura e seção transversal definidas, pronta para a compactação. O lançamento é realizado por vibroacabadoras (Figura 18) que sejam capazes de executar camadas de 25mm até aproximadamente 300mm de espessura, em larguras ajustáveis de acordo com o projeto (BERNUCCI et al, 2008). As velocidades de deslocamento são reguláveis e podem atingir até 20m/min. As vibroacabadoras são compostas por duas unidades: a tratora e a de nivelamento.

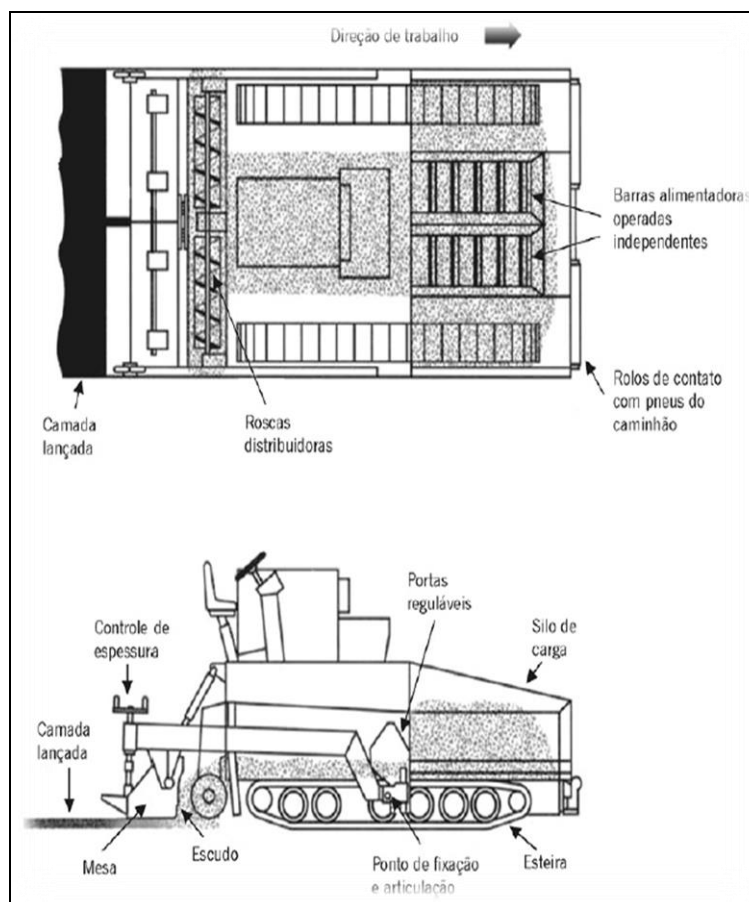
Figura 18 - Esquema de componentes de uma vibroacabadora de pneus



Fonte: Bernucci et al (2008)

Conforme observado na Figura 18, a unidade tratora envolve o motor, apoiada sobre um par de pneus, tem como funções o deslocamento da vibroacabadora e o recebimento, condução e lançamento uniforme da carga de mistura à frente da unidade de nivelamento. A unidade de nivelamento é formada por uma mesa flutuante e vibratória ligada à unidade tratora por braços de nivelamento fixados através de articulações próximas à parte central do equipamento. Suas funções são nivelar e pré-compactar a mistura asfáltica sobre a superfície em que foi lançada, de acordo com especificações de geometria previamente definidas. A Figura 19 mostra uma vibroacabadora do tipo esteira (BERNUCCI et al, 2008)

Figura 19 - Esquema de uma vibroacabadora de esteiras



Fonte: Bernucci, et al (2008)

### 3.5 COMPACTAÇÃO

A compactação da camada da pré-mistura a frio aumenta a estabilidade da mistura asfáltica, proporciona uma superfície suave e desempenada, reduz seu índice de vazios e aumenta sua vida útil (BERNUCCI et al, 2008).

De acordo com os autores, no Brasil, a espessura máxima de mistura asfáltica compactada em uma única vez é de 100mm e está relacionada com a eficiência dos equipamentos de compactação disponíveis. Usualmente essas espessuras em uma única camada de compactação não ultrapassam 75 a 80mm

O processo de execução da camada do PMF geralmente é compreendido por duas fases: a rolagem de compactação e a rolagem de acabamento. É na fase de rolagem de compactação que alcança a densidade, a impermeabilidade e a grande parte da suavidade superficial. Na rolagem de acabamento são corrigidas marcas

deixadas na superfície da camada pela fase de rolagem anterior (BERNUCCI et al, 2008).

Existem dois tipos de rolos compactadores, estáticos e vibratórios. A compactação obtida pelos rolos compactadores estáticos é devida ao seu peso próprio (Figura 20 a). O rolo de pneus (Figura 20 b) tem um ajuste adicional pela possibilidade de variação da pressão dos pneus.

Figura 20 - Exemplos de rolo compactador estático, (a) Pneumático, (b) Liso



(a)

(b)

Fonte: Bernucci et al (2008)

Os rolos compactadores vibratórios são compostos por um ou dois tambores de aço com pesos giratórios, estes pesos criam forças dinâmicas que, somadas ao seu peso próprio, aumentam o esforço de compactação. A Figura 21 mostra um exemplo de rolo vibratório (BERNUCCI et al, 2008).



Figura 21 - Exemplo de rolo vibratório



Fonte: Bernucci et al (2008)

O processo do controle de compactação é feito utilizando dois ensaios que determinam o grau de compactação (razão entre a massa específica aparente da mistura compactada e a massa específica aparente do projeto) e verificam a homogeneidade e a suavidade da superfície da camada compactada. A massa específica aparente pode ser determinada pela remoção de corpos-de-prova da camada compactada e analisada em laboratório (DNIT 164/2013-ME) ou pela utilização de densímetros com fontes radioativas ou eletromagnéticas. A suavidade (regularidade) e a homogeneidade da superfície são verificadas por meio de réguas ou equipamentos do tipo perfilometrô. A compactação será dada por finalizada, quando a camada apresentar sua superfície uniforme, isenta de ondulações e sem saliência ou rebaixos (BERNUCCI et al, 2008).

### 3.6 CUSTO EXECUTIVO

De forma a comparar as composições de serviços de CBUQ e PMF foram utilizado as composições de custo unitário SICRO 2 do DNIT da região Centro-Oeste. Para execução do PMF levando em conta o preço dos equipamentos, mão-de-obra e a usinagem (Figura 22) com base de março de 2014, o valor unitário total é de R\$ 98,59/m<sup>3</sup>.

Figura 22 - Custo Unitário do PMF

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários			Construção Rodoviária			SICRO2
Custo Unitário de Referência		Mês : Março / 2014	Distrito Federal			RCTR0320
2 S 02 530 00 - Pré-misturado a frio			Produção da Equipe : 22,00 m3			(Valores em R\$)
A - Equipamento		Quantidade	Utilização		Custo Operacional	
			Operativa Improdutiva		Operativo Improdutivo	
E007 - Trator Agrícola - (74 kW)		1,00	0,17	0,83	64,64	10,46
E102 - Rolo Compactador - Tanden vibrat. autoprop. 10,2 t (82 kW)		1,00	0,40	0,60	105,83	10,46
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)		1,00	0,41	0,59	113,43	10,46
E107 - Vassoura Mecânica - rebocável		1,00	0,17	0,83	4,65	0,00
E149 - Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras (82 kW)		1,00	0,56	0,44	159,45	18,86
E404 - Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t (210 kW)		2,47	1,00	0,00	125,88	10,46
					Custo Horário de Equipamentos	
					530,29	
B - Mão-de-Obra		Quantidade	Salário-Hora			Custo Horário
T511 - Encarreg. de pavimentação		1,00	27,19			27,20
T701 - Servente		8,00	6,75			54,02
					Custo Horário da Mão-de-Obra	
					81,22	
					Adc.M.O. - Ferramentas: ( 15,51 %)	
					12,60	
					Custo Horário de Execução	
					624,11	
					Custo Unitário de Execução	
					28,37	
D - Atividades Auxiliares		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário
1 A 01 397 02 - Usinagem de P.M.F.		1,0000	m3	47,48		47,48
					Custo Total das Atividades	
					47,48	
E - Transporte de Materiais		Toneladas / Unidade de Serviço				Custo Unitário
M107 - Emulsão asfáltica RM-1C		0,1400				
F - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais		Toneladas / Unidade de Serviço				Custo Unitário
1 A 01 170 01 - Areia extraída com escavadeira hidráulica		0,2700				
1 A 01 200 01 - Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h		1,8900				
1 A 01 397 02 - Usinagem de P.M.F.		2,3000				
DNIT - Sistema de Custos Rodoviários			Construção Rodoviária			SICRO2
Custo Unitário de Referência		Mês : Março / 2014	Distrito Federal			RCTR0320
2 S 02 530 00 - Pré-misturado a frio			Produção da Equipe : 22,00 m3			(Valores em R\$)
					Custo Unitário Direto Total	
					75,85	
					Lucro e Despesas Indiretas ( 29,98 %)	
					22,74	
					Preço Unitário Total	
					98,59	

Fonte: DNIT (2014)

Já para a composição de CBUQ – Capa de Rolamento (Figura 23) observamos que a unidade da execução do CBUQ está em t, considerando a densidade da mistura asfáltica CBUQ em torno de  $2,4t/m^3$  constatamos que o preço

unitário total do CBUQ em  $m^3$  é de R\$ 231,21 reais, 42,6% mais caro que o serviço do PMF.

Figura 23 - Custo Unitário do CBUQ

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários				Construção Rodoviária		SICRO2			
Custo Unitário de Referência		Mês : Março / 2014		Distrito Federal		RCTR0320			
2 S 02 540 51 - CBUQ - capa rolamento AC/BC				Produção da Equipe : 75,00 t		(Valores em R\$)			
A - Equipamento				Quantidade	Utilização		Custo Operacional	Custo Horário	
					Operativa	Improdutiva	Operativo	Improdutivo	
E007 - Trator Agrícola - (74 kW)				1,00	0,24	0,76	64,64	10,46	23,47
E102 - Rolo Compactador - Tanden vibrat. autoprop. 10,2 t (82 kW)				1,00	0,56	0,44	105,83	10,46	63,87
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)				2,00	0,29	0,71	113,43	10,46	80,65
E107 - Vassoura Mecânica - rebocável				1,00	0,24	0,76	4,65	0,00	1,12
E149 - Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras (82 kW)				1,00	0,81	0,19	159,45	18,86	132,74
E404 - Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t (210 kW)				1,53	1,00	0,00	125,88	10,46	192,61
				Custo Horário de Equipamentos					494,45
B - Mão-de-Obra				Quantidade	Salário-Hora			Custo Horário	
T511 - Encarreg. de pavimentação				1,00	27,19			27,20	
T701 - Servente				8,00	6,75			54,02	
				Custo Horário da Mão-de-Obra					81,22
				Adc.M.O. - Ferramentas: ( 15,51 %)					12,60
				Custo Horário de Execução					588,27
				Custo Unitário de Execução					7,84
D - Atividades Auxiliares				Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
1 A 01 390 52 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC				1,0000	t	66,87		66,87	
				Custo Total das Atividades					66,87
E - Transporte de Materiais				Toneladas / Unidade de Serviço				Custo Unitário	
M101 - Cimento asfáltico CAP 50/70				0,0550					
M905 - Filler				0,0280					
F - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais				Toneladas / Unidade de Serviço				Custo Unitário	
1 A 00 716 00 - Areia comercial				0,0800					
1 A 00 717 00 - Brita Comercial				0,8370					
1 A 01 390 52 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC				1,0000					
DNIT - Sistema de Custos Rodoviários				Construção Rodoviária				SICRO2	
Custo Unitário de Referência		Mês : Março / 2014		Distrito Federal				RCTR0320	
2 S 02 540 51 - CBUQ - capa rolamento AC/BC				Produção da Equipe : 75,00 t				(Valores em R\$)	
				Custo Unitário Direto Total				74,71	
				Lucro e Despesas Indiretas ( 29,98 %)				22,40	
				Preço Unitário Total				97,11	

Fonte: DNIT (2014)

Conforme observado nas figuras 22 e 23 não foram comparados os insumos dos materiais ligantes, pois o foco da pesquisa está no processo executivo.

### 3.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS

A tecnologia de revestimentos asfálticos a frio vem apresentando uma crescente evolução em todo o mundo, através do aperfeiçoamento químico dos produtos e variedade dos tipos de emulsões, permitindo que os técnicos disponham de um material eficaz, versátil e econômico.

O PMF é um tipo de mistura de fácil processo executivo, o que faz com que ganhe espaço cada vez mais, principalmente em casos onde se pretende reduzir custos. Assim, a solução com o pré-misturado a frio vem sendo muito estudada como alternativa na execução de bases e revestimentos asfálticos (BERNUCCI et al, 2008). Entretanto, mesmo apresentando um enorme potencial para utilização como camada de revestimento, sua maior utilização no Brasil é na execução de camada de regularização e reforço da estrutura do pavimento, além de serviços rotineiros do tipo tapa-buracos.

Como já informado, o PMF pode ser classificado como aberto, semi-denso e denso. Os PMFsA podem ser aplicados como camada de revestimento ou camada intermediária, apresentando a vantagem de elevada rugosidade, o que permite uma ótima aderência pneu/pavimento, diminuindo os riscos de derrapagem. Assim, devido à facilidade de produção, estocagem, transporte, aplicação e manuseio no campo, o PMF aberto é uma ótima solução para vias de tráfego leve e médio, tendo vantagem de poder ser armazenado por mais tempo do que o PMF denso, oferecendo maior flexibilidade na programação do serviço (VIEIRA, 2009).

O PMF do tipo denso possui aparência do concreto asfáltico usinado a quente, possuindo baixo índice de vazios, apresentando, um excelente comportamento estrutural e funcional para vias de tráfego médio, proporcionando um ótimo acabamento na superfície e excelente conforto de rolamento. Todos esses tipos de PMFs possuem a vantagem de liberar a camada executada de forma imediata para o tráfego.

Em Oron State University (OSU), foi feito um estudo onde foram analisados rodovias com revestimentos PMFs. A pesquisa teve um bom resultado e os pesquisadores consideraram o revestimento pré-misturado a frio com um comportamento igual ou superior às misturas a quente (SANTANA, 1993).

As principais vantagens na utilização do PMF são:

- Aplicação a Frio;
- Utilização de maquinário simples;
- Podem ser produzidas em locais de difícil acesso, reduzindo os custos de transporte e facilitando a logística envolvida;
- São aplicadas de forma rápida;
- Possibilidade de utilização de agregados úmidos, dispensando a secagem e o aquecimento dos agregados;
- Devido à desividade das emulsões asfálticas catiônicas, há a possibilidade de se utilizar agregados originários de quase qualquer rocha;
- Possibilidade de estocar a mistura asfáltica;
- Facilidade de produção, transporte, aplicação e manuseio da massa asfáltica no campo;
- Aumento na produtividade na aplicação, devido à facilidade de manuseio e transporte, utilização de equipamento e usinas de asfalto de pouca complexidade;
- Possibilidade de aplicação da mistura asfáltica sobre superfícies úmidas;
- Elevada capacidade de suporte às grandes deflexões das camadas subjacentes, sem fissuras ou trincar;
- Diminuição na emissão de gases tóxicos e poluente, melhorando as condições de saúde e segurança e preservando o ambiente.

Quando comparado ao CBUQ, o asfalto convencional, o PMF apresenta como vantagens:

- Baixo custo de preparação da mistura, em relação à usinagem, não necessitando de tambor rotativo secador e recuperador de filler;
- Baixo custo de equipamentos necessários para a produção;
- Baixo consumo de energia térmica e elétrica envolvida durante a operação de transporte, manuseio, estocagem e aplicação dos materiais (cerca de 70% da energia consumida pelas misturas asfálticas a quente);
- Transporte menos crítico do que as misturas a quente, dispondo-se de mais tempo para as eventualidades;

- Menor risco de incêndios, explosões e acidentes de trabalho;

Os PMFs possuem limitações em sua utilização. Dependendo da carga de tráfego, sua aplicação pode não ser vantajosa quando comparado com o CBUQ. A mistura a frio apresenta maior desgaste ao uso e um envelhecimento mais rápido. A maior desvantagem do uso de mistura a frio é por ter um lento desenvolvimento de resistência (VIEIRA, 2009).

Um projeto bem executado com o CBUQ deve apresentar máxima impermeabilidade ao ar e a água, estabilidade e resistência à fadiga satisfatória para um valor de N elevado (BERNUCCI et al, 2008). As principais características vantajosas do CBUQ quando comparado ao PMF são:

- Mais duráveis;
- Menos sensíveis a ação da água e do ar;
- Apresentam uma taxa de envelhecimento mais lenta;
- Suportam muito bem o tráfego pesado;
- Não exigem cura;

Como principais desvantagens da aplicação do CBUQ podem-se destacar:

- Difícil fabricação, exigindo mão-de-obra mais especializada do que a aplicação com PMF;
- Exigem aquecimento do agregado;
- Necessidade de equipamento especial para o processo construtivo;
- Não permitem estocagem das misturas;
- Acarreta em maior dano ao meio ambiente

Após a execução, o pré-misturado a frio não proporcionará padrões mecânicos idênticos aos de um concreto asfáltico. Porém, o PMF irá aumentar a resistência ao longo do tempo.

## 4. CONCLUSÕES

O pré-misturado a frio é uma mistura constituída basicamente por agregados e ligantes asfálticos. O PMF pode ser usado como base, regularização, reforço de pavimento e nas operações tapa-buracos. No Brasil, seu maior emprego ainda se destina à execução de camada de regularização e reforço da estrutura do pavimento, além de serviços rotineiros de conserva “tapa-buracos”.

O revestimento de pré-misturado a frio é construído para suportar as cargas provenientes do tráfego leve e médio, além da tarefa de fornecer segurança, conforto aos usuários da rodovia. A utilização do PMF vem melhorando as condições das vias e diminuindo os defeitos funcionais e estruturais do pavimento.

Essa pesquisa analisou a viabilidade da utilização do pré-misturado a frio, mostrando os melhores conceitos e propriedades do revestimento, levando em conta as principais vantagens e desvantagens oriundas de seu uso e um comparativo de custos com a principal técnica utilizada como revestimento, o CBUQ.

Comparada com o CBUQ, a utilização do PMF origina inúmeras vantagens, tais como: redução de custo através da utilização de máquinas mais simples na usinagem, maior produtividade na aplicação devido à facilidade de manuseio e transporte, e um menor impacto ambiental por ter uma reduzida emissão de gases tóxicos e baixo consumo de energia elétrica.

A maior desvantagem do uso de pré-misturado a frio é o lento desenvolvimento de resistência, fenômeno controlado pela perda de umidade da mistura, motivo por não serem mais duráveis e nem suportarem muito bem o tráfego pesado igual o CBUQ.

A execução do pré-misturado a frio tem que ser realizada em dia não chuvoso com a temperatura superior a 10°C. Os PMFs podem ser usados em camada de 30 a 70mm de espessuras compactada, dependendo do tipo de serviço e da granulometria da mistura, espessuras maiores devem ser compactadas em duas camadas. A camada recém-acabada poderá ser aberta ao tráfego imediatamente após o término do serviço de compactação, desde que não se note deformação ou desagregação.

A facilidade com que se pode produzir, transportar e executar o PMF faz com que essa técnica ganhe espaços em muitas cidades que querem pavimentar e não dispõem de muita tecnologia e nem de grandes recursos financeiros. Assim, esse trabalho conclui que o pré-misturado a frio tendo um bom projeto e bem executado, pode ser utilizado como camada de regularização e reforço da estrutura do pavimento e também como revestimentos em rodovias de baixo e médio volume de tráfego fornecendo segurança, conforto e economia.



## **5. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Realização de ensaios do asfalto pré-misturado a frio e CBUQ com os mesmos agregados para uma possível comparação em laboratório.

Fazer uma comparação entre corpos de prova com procedimento de cura e sem cura.

Fazer comparação de custos do PMF e CBUQ para as mesmas condições de execução.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Manual Básico de Emulsões Asfáltica, Brasil 2001

AIKMAN, E. Engineering Brief no 23 – Open-Graded Asphalt Emulsion Mixes. Disponível em [www.faa.gov](http://www.faa.gov) , 2006

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 720/1982: Termologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982

Associação Brasileira de Concreto Portland (CPC M3 / 4)

BALBO, José Tadeu. Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa Soares. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, 2008. PETROBRAS: ADEBA, 2008. Disponível em [http://www.proasfalto.com.br/pdf/Asfalto\\_Capitulo\\_04\\_Mar2010.pdf](http://www.proasfalto.com.br/pdf/Asfalto_Capitulo_04_Mar2010.pdf). Acesso em 12/06/2014.

CNT – Confederação Nacional Dos Transportes

DNER-ES 386/99. Pavimentação - pré- misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito

DNER-ME 107/94. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall

DNIT 153/2010- ES. Pavimentação Asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional

DNIT 149/2010-ES. Pavimentação asfáltica - macadame betuminoso com ligante asfáltico convencional por penetração

DNIT 146/2012-ES. Pavimentação - tratamento superficial simples

DNIT 147/2012-ES. Pavimentação asfáltica- tratamento superficial duplo

DNIT 148/2012-ES. Pavimentação asfáltica - tratamento superficial triplo

DNIT 032/2004 – ES. Pavimentos Flexíveis – Areia- Asfalto a quente.

DNIT 150/2010-ES. Pavimentação asfáltica - lama asfáltica

DNIT 164/2013-ME. Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio

DNIT 031/2006- ES. Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico

FERRARA, Renata D’Avello. Estudo comparativo do custo x benefício entre o asfalto convencional e o asfalto modificado pela adição de borracha moída de pneu. Universidade Anhembí Morumbi. São Paulo, 2006. Disponível em <http://engenharia.anhembibm.com.br/tcc-06/civil-57.pdf>. Acesso em 12/06/2014

GRECO, Profa. Jisela Aparecida Santanna Greco. Construção de Estradas e Vias Urbanas – Disciplina: ETG033

MANUAL DE PAVIMENTACAO DO DNIT (2006)

NOGUEIRA, Fernando. Construção da Super Estrutura, 2013

ROCHA, Robson Soares da. Patologias de pavimentos asfálticos e suas recuperações. Estudo de Caso da Avenida Pinto de Aguiar. Disponível em [http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/Art3\\_0029.pdf](http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/Art3_0029.pdf). Acesso em 12/06/2014.

SANTANA, Professor Humberto Santana. Manual de Pré-misturados a frio, 1993

SENÇO. Manual de Técnicas de Pavimentação, volume 2 / Wlastermiller de Senço – 1. Ed. – São Paulo : Pini, 2001.

VIEIRA, Bruno Cardoso. Análise da viabilidade do uso de pré-misturados a frio em aeródromos. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2009. Disponível em [http://www.civil.ita.br/graduacao/tgs/resumos/2009/TGIEI004\\_Bruno\\_Vieira.pdf](http://www.civil.ita.br/graduacao/tgs/resumos/2009/TGIEI004_Bruno_Vieira.pdf). Acesso em 12/06/2014